11.19

Spektrum der Wissenschaft

Die extremsten Orte im Universum

Auf der Spur gigantischer Teilchenschleudern

www.Spektrum.de 11.19

8,90 € (D/A/L) · 14,– sFr. D6179E
Deutsche Ausgabe des SCIENTIFIC AMERICAN

ARCHÄOLOGIE Schon in der Steinzeit brauten Menschen Bier

ULTRADÜNNE MATERIALIEN Neue Stoffe für die Nanotechnologie

DENGUEFIEBER Heiß ersehnter Impfstoff – mit Tücken



EDITORIAL
UNSTILLBARE NEUGIER

Daniel Lingenhöhl, Chefredakteur
lingenhoehl@spektrum.de

Neugier ist eine umstrittene, aber zutiefst menschliche Eigenschaft. Ohne sie gäbe es kaum wissenschaftlichen Fortschritt: Erst der innere Drang von Forscherinnen und Forschern, Neues zu entdecken und dann näher zu untersuchen, ermöglicht die rasante Entwicklung unseres Wissensstands und unserer technischen Fähigkeiten, wie wir sie kennen.

Seit ich mich erinnern kann, treibt auch mich diese Neugier an: Schon immer wollte ich mehr über die uns umgebende Natur wissen. Es begann im Kindesalter mit Käfern und Schmetterlingen im Garten der Eltern und setzte sich während der Schulzeit fort, in der die Naturwissenschaften meine bevorzugten Fächer waren. Und die Faszination, die unsere Umwelt und ihre Gesetze auf mich ausüben, endete nicht mit dem Ende meines Studiums der Geowissenschaften, sondern erlebte mit dem Eintritt bei »Spektrum der Wissenschaft« vor 15 Jahren einen weiteren Aufschwung.

Heute interessieren mich nicht mehr »nur« Fragen der Biodiversität oder der Vulkanologie. Ich warte gespannt auf die ersten Aufnahmen eines Schwarzen Lochs oder exakte Bilder von Pluto. Und die aktuellen Fortschritte in der Gentechnik interessieren mich ebenso wie neue Technologien der Energieerzeugung.

Deshalb freue ich mich nun sehr auf meine neue Aufgabe als Chefredakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«, nachdem ich in den letzten neun Jahren als Redaktionsleiter Online die Berichterstattung auf »Spektrum.de« verantwortet habe. Der Charakter Ihres Magazins wird sich damit nicht verändern: Wir werden weiterhin »Wissenschaft aus erster Hand« liefern – tiefgründige Einblicke in die Welt der Forschung, geschrieben und eingeordnet von Expertinnen und Experten der jeweiligen Fachgebiete. Daneben möchte ich Ihr Magazin digital präsenter und nutzerfreundlicher machen, so dass Sie es bei Bedarf noch leichter unterwegs genießen können.

Dazu in Zukunft mehr. Jetzt möchte ich meinem Vorgänger Carsten Könneker erst einmal alles Gute für seine berufliche Zukunft außerhalb von »Spektrum der Wissenschaft« wünschen und ihm herzlich für die hervorragende Arbeit der vergangenen Jahre danken!

Eine spannende Lektüre wünscht Ihnen



NEU AM KIOSK!

Unser **Spektrum** SPEZIAL 3.19 Physik – Mathematik – Technik 3.19 gibt Einblicke in extreme Phänomene, exotische Teilchen und ferne Welten.

IN DIESER AUSGABE



WERNER HOFMANN

Der renommierte Heidelberger Astrophysiker berichtet ab S. 12 über ein Observatorium der Superlative, das die extremsten Regionen im All beobachten wird.





JOSE J. BALDOVI UND ANGEL RUBIO

Die beiden spanischen Materialwissenschaftler beschreiben ab S. 52, welche viel versprechenden Anwendungen sich aus zweidimensionalen Materialien ergeben könnten.





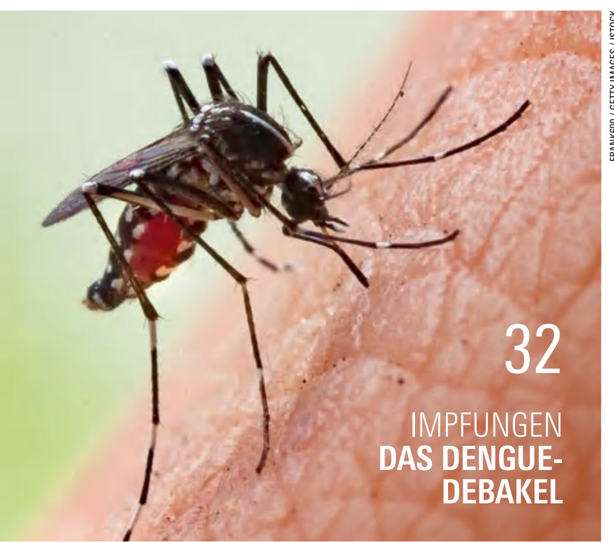
DIETER HOFFMANN UND HUBERT LAITKO

Die Wissenschaftshistoriker untersuchen die Geschichte von Forschern und Forschungspolitik. Ab S. 64 verfolgen sie die wechselhafte Karriere eines Vorzeigegelehrten in der NS-Zeit und der DDR.

INHALT

TITELBILD:
HADZI3 / GETTY IMAGES / ISTOCK;
STRAHL: TEEKID / GETTY IMAGES / ISTOCK;
BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

NASA, ESA, HUBBLE HERITAGE TEAM



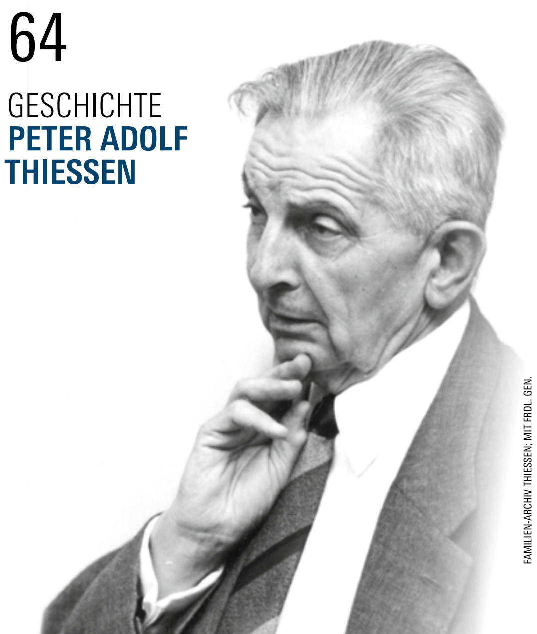
FRANK600 / GETTY IMAGES / ISTOCK



DANIELRAO / GETTY IMAGES / ISTOCK



MIKEMAREEN / GETTY IMAGES / ISTOCK; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT



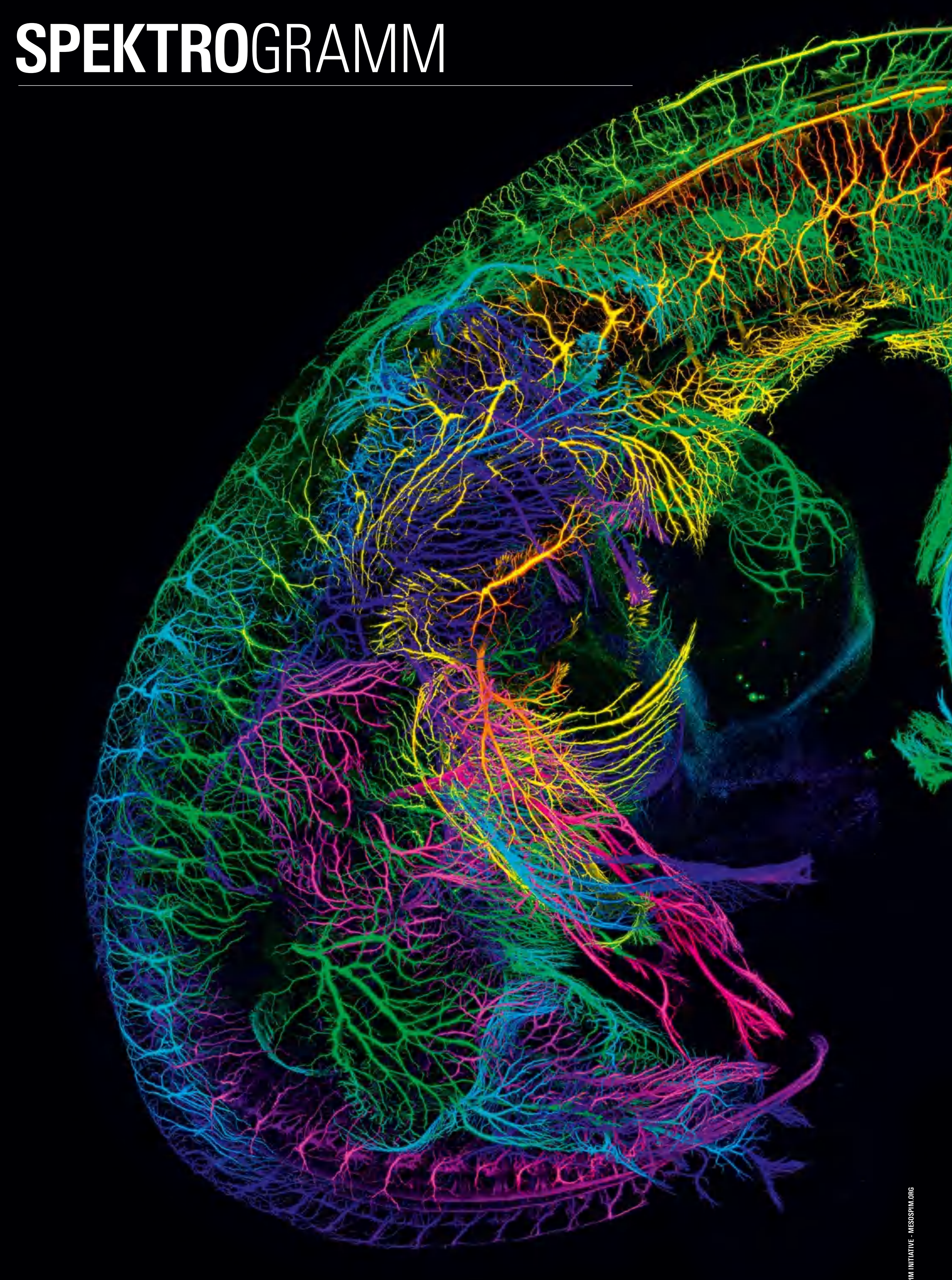
FAMILIEN-ARCHIV THIESSEN; MIT FRDL. GEN. VON DIETER HOFFMANN



Alle Artikel auch digital auf **Spektrum.de**

Auf **Spektrum.de** berichten unsere Redakteure täglich aus der Wissenschaft: fundiert, aktuell, exklusiv.

SPEKTROGRAMM



THE MESOSPIM INITIATIVE - MESOSPIM.ORG

1 Millimeter

NERVENSYSTEM EINES HÜHNEREMBRYOS

Die Lichtscheibenmikroskopie liefert beeindruckende 3-D-Bilder von Tiergewebe. Statt eine Probe in hauchdünne Scheiben zu zerschneiden, bestrahlt man sie senkrecht zur Beobachtungsrichtung mit einem aufgefächerten Laser. Tote Tiere, deren Inneres durch das Entfernen von Fetten durchsichtig gemacht wurde, lassen sich auf diese Weise Schicht für Schicht abbilden.

Das Verfahren ist jedoch recht langsam und aufwändig. Außerdem sind die wenigsten Lichtscheibenmikroskope für Proben geeignet, die mehrere Millimeter oder gar Zentimeter groß sind.

Eine Gruppe um Fabian Voigt von der Universität Zürich hat das Verfahren daher nun weiterentwickelt: Ihr Mikroskop verfügt unter anderem über eine zoombare Weitwinkeloptik, eine spezielle Kamera und die Möglichkeit, ausgedehnte Proben schrittweise um eine Achse zu drehen. Mit der mesoSPIM genannten Technik könne man binnen Minuten hoch aufgelöste 3-D-Aufnahmen von ganzen Tieren anfertigen, berichten die Forscher. Als Beispiel lichteten sie die Nervenbahnen eines gerade einmal sieben Tage alten, präparierten Hühnerembryos ab. Auf dem Bild lassen sich Details erkennen, die nur ein Fünftel der Ausdehnung eines menschlichen Haars haben.

Nature Methods 10.1038/s41592-019-0554-0, 2019





OXFORD, SOUTH AFRICAN RADIO ASTRONOMY OBSERVATORY (SARAO)

Neben helleren Radioquellen kann man im galaktischen Zentrum die Ränder zweier diffuser Blasen erkennen. Wie große Ballons erstrecken sie sich bis zur oberen und unteren Bildkante.

ASTRONOMIE
RADIOBLASEN IM GALAKTISCHEN ZENTRUM

Astronomen haben im Zentrum der Milchstraße zwei riesige Blasen entdeckt, die Radiostrahlung abgeben. Wie die Arbeitsgruppe vom South African Radio Astronomy Observatory berichtet, gehen die etwa 1400 Lichtjahre großen Strukturen auf eine kurze Phase starker Aktivität zurück, bei der sich Stoßwellen aus geladenen Teilchen bildeten. Ober- und unterhalb der galaktischen Scheibe trafen sie auf kühleres Gas, wobei die Teilchen durch die Wechselwirkung mit Magnetfeldern Radiowellen abgaben.

Aus der symmetrischen Form der Strukturen schließt das Team, dass die Blasen auf ein Ereignis zurückgehen, das sich vor etwa sieben Millionen Jahren in unmittelbarer Nähe des galaktischen Zentrums abgespielt hat. Was genau die heftige Aktivität ausgelöst hat, ist noch unklar. Einerseits könnte die Strahlung einer neu entstandenen Gruppe von Sternen Gas erwärmt und ins All gepustet haben. Andererseits könnte das Schwarze Loch im Mittelpunkt unserer Galaxie verantwortlich sein. Es saugt immer wieder Materie an; die dabei freigesetzte Gravitationsenergie kann zu Stoßwellen oder gebündelten Strahlungsjets führen.

Radioblasen sind bereits von anderen Galaxien bekannt. Das Zentrum der Milchstraße war in jüngerer Vergangenheit jedoch zu ruhig, als dass sich vergleichbare Strukturen hätten bilden können. Die neuen Daten zeigen, dass sich die Aktivität im galaktischen Zentrum immer wieder zu ändern scheint. Dies unterstreichen auch andere aktuelle Messungen, denen zufolge das Umfeld des Schwarzen Lochs zuletzt ungewöhnlich viel Strahlung abgegeben hat.

Nature 10.1038/s41586-019-1532-5, 2019

MATHEMATIK
MIT KUBIKZAHLEN ZUR 42

Mit Hilfe von etlichen Privatcomputern haben zwei Mathematiker jene drei Zahlen gefunden, deren dritte Potenzen sich genau zu 42 addieren. Damit ist eine Frage geklärt, die Experten seit 65 Jahren beschäftigt: Kann man alle natürlichen Zahlen bis 100 als Summe dreier Kubikzahlen darstellen? Als Gleichung ausgedrückt: $x^3 + y^3 + z^3 = n$.

Die Beziehung ist seit der Antike bekannt. Doch erst seit Mitte der 1950er Jahre, als elektronische Rechenmaschinen aufkamen, fahnden Mathematiker systematisch nach den Kubikzahl-Summanden. Die Suche ist schwieriger, als es auf den ersten Blick erscheint: Anders als die Quadratzahlen kann die dritte Potenz einer Zahl auch negativ sein. Damit steigen die Möglichkeiten ins Unermessliche.

Dennoch entdeckten Fachleute und Amateure mit Hilfe von Computern und modernen Algorithmen nach und nach für alle Zahlen bis 100 die entsprechenden Kubikzahlen – mit Ausnahme der 33 und der 42. Im Jahr 2019 entwickelte der Mathematiker Andrew Booker von der University of Bristol einen neuen Algorithmus, mit dem er innerhalb von drei Wochen auf einem Supercomputer die 33 knackte, nicht aber die 42.

Um Letzterer zu Leibe zu rücken, tat er sich mit Andrew Sutherland vom Massachusetts Institute of Technology zusammen, einem Fachmann für parallele Berechnungen, bei denen unzählige Computer gleichzeitig Teilaufgaben eines Problems bearbeiten. Die Computer lieferte die »Charity Engine« – eine Software, die freie Rechenleistung von Privatrechnern bündelt und für aufwändige Projekte vermietet. An der Suche nach den Kubikzahlen der 42 waren letztlich eine halbe Million Computer beteiligt, die insgesamt eine Million Rechenstunden aufwandten. Ihr Ergebnis: Summiert man die dritten Potenzen der Zahlen –80 538 738 812 075 974, 80 435 758 145 817 515 und 12 602 123 297 335 631, erhält man exakt die 42.

Pressemitteilung der University of Bristol, September 2019

BIOLOGIE
ZITTERAAL STELLT SCHOCKREKORD AUF

Seit der Erstbeschreibung im Jahr 1766 gilt der Zitteraal als einzige Art seiner Gattung. Die südamerikanischen Tiere sind bekannt dafür, dass sie mit Hilfe elektrischer Reize navigieren – und heftige Stromschläge bei der Jagd und zur Selbstverteidigung nutzen. Nun hat ein internationales Forscherteam entdeckt, dass sich die vermeintlich einzige Zitteraalspezies in Wirklichkeit in drei äußerlich kaum unterscheidbare Arten aufteilt, wie Wissenschaftler um David de Santana vom National Museum of Natural History in Washington berichten.

Das Team hat die Kern- und Mitochondrien-DNA von insgesamt 107 Zitteraalen ausgewertet, die aus verschiedenen Regionen Südamerikas stammen. Die drei Arten der Gattung *Electrophorus* dominieren demnach verschiedene Lebensräume: Die bisher bekannte Spezies *Electrophorus electricus* lebt in den Flüssen des Berglands von Guayana. Die neu beschriebenen Arten *E. voltai* und *E. varii* sind dagegen im Einzugsgebiet der großen brasilianischen Flüsse beziehungsweise im Tiefland des Amazonasbeckens zu Hause. *E. varii* hat sich den genetischen Daten zufolge vor rund sieben Millionen Jahren abgespalten, während die beiden anderen Spezies seit etwa dreieinhalb Millionen Jahre getrennte Wege gehen.

E. voltai kann deutlich stärkere Stromschläge austeilen, als man es bei Zitteraalen bisher beobachtet hat. Der Fisch schafft eine Spannung von rund 860 Volt – der Weltrekord bei der von Tieren erzeugten Bioelektrizität. Die elektrischen Impulse dienen der Art hauptsächlich zur Aufklärung: Lebende Objekte wie etwa Beutetiere leiten Strom anders als tote, weshalb der Zitteraal sie im trüben Wasser unterscheiden kann. Produziert wird die Ladung im Inneren spezialisierter Muskelzellen, den Elektrozyten: Öffnen sich in deren Zellmembran Ionenkanäle, so fließen positive Ionen hinein und bauen eine Spannung auf.

Nature Communications, 10.1038/s41467-019-11690-z, 2019


LEANDRO SOUSA, UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ, BRASILIEN

Die neu entdeckte Zitteraalart *Electrophorus voltai* lebt im brasilianischen Amazonasgebiet.

MEDIZIN
FADENROBOTOR FÜR HIRNOPERATIONEN

Schon länger arbeiten Wissenschaftler an miniaturisierten Medizinrobotern für die Blutbahn. Diese müssen sich möglichst gezielt durch enge Kapillaren bewegen, ohne dabei stecken zu bleiben. Ein Team um Xuanhe Zhao vom Massachusetts Institute of Technology hat hierfür nun eine neue Technik entwickelt. Der fadenförmige Roboterwurm lässt sich mit Hilfe von Magnetfeldern lenken und soll anders als frühere Entwürfe auch durch enge Blutgefäße im menschlichen Gehirn passen.

Dort könnte er beispielsweise kleinste Verstopfungen nach Schlaganfällen auflösen. Hierbei verschließt meist ein Blutpfropf eine Hirnarterie, oder Hirngefäße schlagen leck. Dann müssen Ärzte schnell handeln, um das Leben des Patienten zu retten und Folgeschäden am Hirngewebe zu begrenzen. In solch einer Situation könnten Miniroboter Zeit sparen und konventionelle Hirn-OPs ergänzen, glauben die Forscher. Ihr dafür konstruiertes Exemplar hat einen Durchmesser von nur 0,6 Millimetern und besteht aus einer Nickel-Titan-Legierung mit Formgedächtnis, die sich nach allen Bewegungen in die Ausgangsstellung zurückbiegt. Überzogen ist das Material von einem Hydrogel, das die Reibung an Gewebestrukturen auf etwa ein Zehntel reduziert.

Der Faden hat sich bislang in verschiedenen Tests bewährt. Unter anderem konnten die Forscher ihn durch einen Parcour im Labor steuern, der Nadelöhre im menschlichen Körper nachstellte. Auch ließ sich der Roboter problemlos durch ein mit Blutersatzflüssigkeit gefülltes Silikon-Kapillarnetz navigieren, das dem Gefäßsystem des Hirns nachgeahmt war. In den nächsten Schritten soll die Praxistauglichkeit an Mäusen getestet werden.

Science Robotics 10.1126/scirobotics.aax7329, 2019


YOONHO KIM, GERMAN A. PARADA, SHENGDUO LIU AND XUANHE ZHAO / MIT

Der Fadenroboter (schwarz) kann selbst durch verschlungene Gänge navigieren. Lenken lässt er sich mit Magnetfeldern.

PHYSIK
STROMGENERATOR FÜR KALTE NÄCHTE

Wissenschaftler haben ein überraschend simples Gerät vorgestellt, das bei Nacht Strom erzeugen kann – wenn auch nur in geringen Mengen. Geht es nach den Forschern um Aaswath Raman von der University of California in Los Angeles, könnte die Erfindung in Gegenden eingesetzt werden, in denen Stromanschlüsse Mangelware sind.

Das Kernstück des Stromerzeugers ist ein handelsüblicher thermoelektrischer Generator, ein so genanntes Peltier-Element. Es erzeugt elektrische Energie, wenn die eine Seite wärmer ist als die andere. Bislang hätten Entwickler meist versucht, diese Temperaturdifferenz mit Hilfe einer Wärmequelle zu erzeugen, so die Forscher. Beispielsweise wird bei einigen Systemen die sonst ungenutzte Abwärme eines Ofens dazu eingesetzt, ein wenig Strom zu generieren.

Raman und Kollegen kamen nun jedoch auf die Idee, eine »Kältequelle« einzusetzen. Ihr Gerät trägt an der Oberseite eine mit schwarzer Farbe bestrichene Aluminiumplatte, die sich im Verlauf der Nacht immer weiter unter die Umgebungstemperatur abkühlt, weil ein Teil der Eigenwärme als Infrarotstrahlung ins All abgegeben wird. Dies ist möglich, da die Atmosphäre in den entsprechenden Wellenlängenbereichen durchlässig ist. Die Unterseite des Geräts hingegen ist mit Aluminiumrippen versehen, die die Umgebungswärme aufnehmen. Dadurch entsteht ein Temperaturgefälle im Innern des Generators.

Bei ihren Tests auf einem Hausdach der Stanford University bei dezemberlicher Kälte stellten die Forscher einen Temperaturunterschied von bis zu zwei Grad Celsius zwischen Ober- und Unterseite fest. Dabei erzeugte ihr schuhkartongroßes Testobjekt eine Leistung von knapp 0,8 Milliwatt – beileibe nicht viel, aber genug, um eine LED-Lampe zum Leuchten zu bringen. Die Kosten für den Prototyp beliefen sich auf weniger als 30 US-Dollar.

Joule 10.1016/j.joule.2019.08.009, 2019

PALÄONTOLOGIE
ALS TIERE LAUFEN LERNTEN

Am Ende des Ediacarium-Zeitalters vor gut 540 Millionen Jahren lernten Lebewesen, sich durch Sediment zu bewegen. Darauf deuten eine ganze Reihe von Spuren hin, die Paläontologen in der Vergangenheit zu Tage gefördert haben. Bei den allermeisten dieser Fossilien ist jedoch unklar, wie die für die Abdrücke verantwortlichen Lebewesen aussahen.

Ein Team um den Geobiologen Shuhai Xiao von der US-amerikanischen Virginia Tech University will nun einen der Verursacher dingfest gemacht haben: In einem Gebirge nahe dem Fluss Jangtsekiang in China entdeckten sie 35 Fossilien eines Tiers, das an einen Doppelfüßer erinnert. Eines von ihnen ist zusammen mit seiner Spur erstarrt, was eine eindeutige Zuordnung ermöglicht.

Yilingia spiciformis war demnach zwischen 0,5 bis 2,5 Zentimeter dick und 27 Zentimeter lang und beendete sein Leben vor geschätzt 551 bis 539 Millionen Jahren im schlammigen Meeresboden. Die Art hatte einen Kopf, allerdings kein hartes Skelett, vermuten die Paläontologen. Außerdem bestand der Körper offenbar aus vielen Segmenten.

Aus Sicht von Wissenschaftlern stellen Segmentierung, Rechts-links-Symmetrie und die Fähigkeit, sich fortzubewegen, bedeutende evolutionäre Innovationen dar. Bisher konnte man nur vermuten, dass sich diese Merkmale bereits im Ediacarium ausgebildet haben. Wahrscheinlich waren sie eine wichtige Voraussetzung dafür, dass sich die Tierwelt im Rahmen der kambrischen Explosion vor 539 Millionen Jahren in kurzer Zeit extrem stark ausdifferenzieren konnte.

Nature 10.1038/s41586-019-1522-7, 2019

Das Fossil aus China stammt von einer Art Doppelfüßer, der vor rund 540 Millionen Jahren über den Meeresboden kroch.

VIRGINIA TECH COLLEGE OF SCIENCE

GENETIK
KURZSCHLAF-MUTATION ENTDECKT

Offenbar beeinflusst ein Gen, wie viel Schlaf wir benötigen: Personen, bei denen es verändert ist, kommen mit deutlich kürzeren Nächten aus als die meisten anderen Menschen.

Ein Team um Ying-Hui Fu von der University of California in San Francisco hat eine Familie untersucht, in der sich mehrere Mitglieder bereits mit vier bis sechs Stunden Schlaf pro Nacht bestens ausgeruht fühlen. Schlafforschern zufolge ist das bei den meisten Menschen eher nach sieben bis acht Stunden der Fall. Wie DNA-Analysen offenbarten, trugen die Kurzschläfer unter den Probanden eine seltene Variante des Gens *ADRB1*. Dieser Erbfaktor codiert für einen Rezeptor, der vor allem in Neuronen in der Brücke (Pons) des Hirnstamms vorkommt. Die Region kontrolliert unbewusste Vorgänge wie Atmung und Augenbewegungen, aber auch den Schlaf. Bei den Kurzschläfern, so beobachteten die Forscher, war der Rezeptor deutlich instabiler als bei den übrigen Teilnehmern, was vermutlich seine Funktion beeinträchtigte.

Daraufhin untersuchten die Wissenschaftler die *ADRB1*-Variante an Mäusen: Tiere mit der Mutation schliefen rund 55 Minuten kürzer als ihre Artgenossen. Aktivierten die Forscher die Nervenzellen künstlich, wachten die Nager augenblicklich auf.

2018 waren Fu und ihre Kollegen bereits auf eine seltene Mutation am Gen *DEC2* gestoßen, welche die Schlafdauer ebenfalls zu verkürzen scheint. *DEC2* beeinflusst die Ausschüttung der Hormone Orexin A und B, die uns wachhalten. Kurzschläfer setzen vermutlich größere Mengen der Hormone frei. Orexinmangel hingegen führt etwa bei Narkoleptikern zum entgegengesetzten Phänomen: Die Betroffenen werden von plötzlich auftretenden Schlafattacken übermannt.

Neuron 10.1016/j.neuron.2019.07.026, 2019



ASTRONOMIE

JAGD NACH DEN KOSMISCHEN BESCHLEUNIGERN

Seit Jahrzehnten suchen Forscher nach den Verursachern der energiereichsten Strahlung im Weltall. Ein großes Observatorium stellt nun völlig neue Einblicke in Aussicht.



Werner Hofmann war Direktor am Max-Planck-Institut für Kernphysik; seit Mitte 2019 ist er im Ruhestand und kann sich – von Verwaltungsaufgaben entbunden – ganz der Wissenschaft widmen. Seine Forschungsinteressen betreffen die Hochenergie-Astrophysik und die Elementarteilchenphysik. Er gehört zu den Gründern des Teleskopsystems H.E.S.S. und des CTA-Projekts. Außerdem ist er Sprecher des Konsortiums, das CTA geplant und entwickelt hat.

⏩ spektrum.de/artikel/1675642



Wenn ein Stern explodiert, bleibt ein hell leuchtender Nebel zurück, wie diese Aufnahme des Hubble-Weltraumteleskops zeigt. Neben sichtbarem Licht geben solche Supernova-Überreste oft auch große Mengen von Gammastrahlung ab.

AUF EINEN BLICK
DAS ALL IM GAMMALICHT

1. Seit 50 Jahren entwickeln Astrophysiker eine spezielle Beobachtungstechnik, mit der sich Gammastrahlung aus dem All auf der Erde nachweisen lässt.

2. Die Forscher wollen damit unter anderem herausfinden, wo die energiereichsten Teilchen im Weltall so stark beschleunigt werden – bisher eines der großen Rätsel der Astrophysik.

3. Derzeit entsteht in Chile und auf La Palma ein großes Observatorium namens CTA, das viele dieser »kosmischen Beschleuniger« aufspüren und im Detail beobachten soll.

Der Wunsch, den Sternenhimmel und das uns umgebende Universum zu verstehen, ist vermutlich so alt wie die Menschheit. Astronomie und Astrophysik haben uns diesem Ziel in den vergangenen Jahrzehnten deutlich näher gebracht. Diese Fortschritte beruhen zum einen darauf, dass Forscher immer größere und empfindlichere Teleskope gebaut haben. Zum anderen haben sie immer wieder neue Fenster zur Beobachtung des Sternenhimmels aufgestoßen.

Heutige Teleskope und Messinstrumente fangen längst nicht nur jenen Teil des Lichtspektrums auf, den Menschen mit bloßem Auge sehen können. Auf der Klaviatur des elektromagnetischen Spektrums entspricht dieses sichtbare Licht gerade mal einer Oktave. Die moderne Astronomie erfasst mittlerweile noch rund 70 weitere: von der langwelligen Radiostrahlung am einen Ende des Spektrums bis hin zur extrem kurzwelligen (und damit besonders energiereichen) Gammastrahlung am anderen (siehe Grafik S. 16).

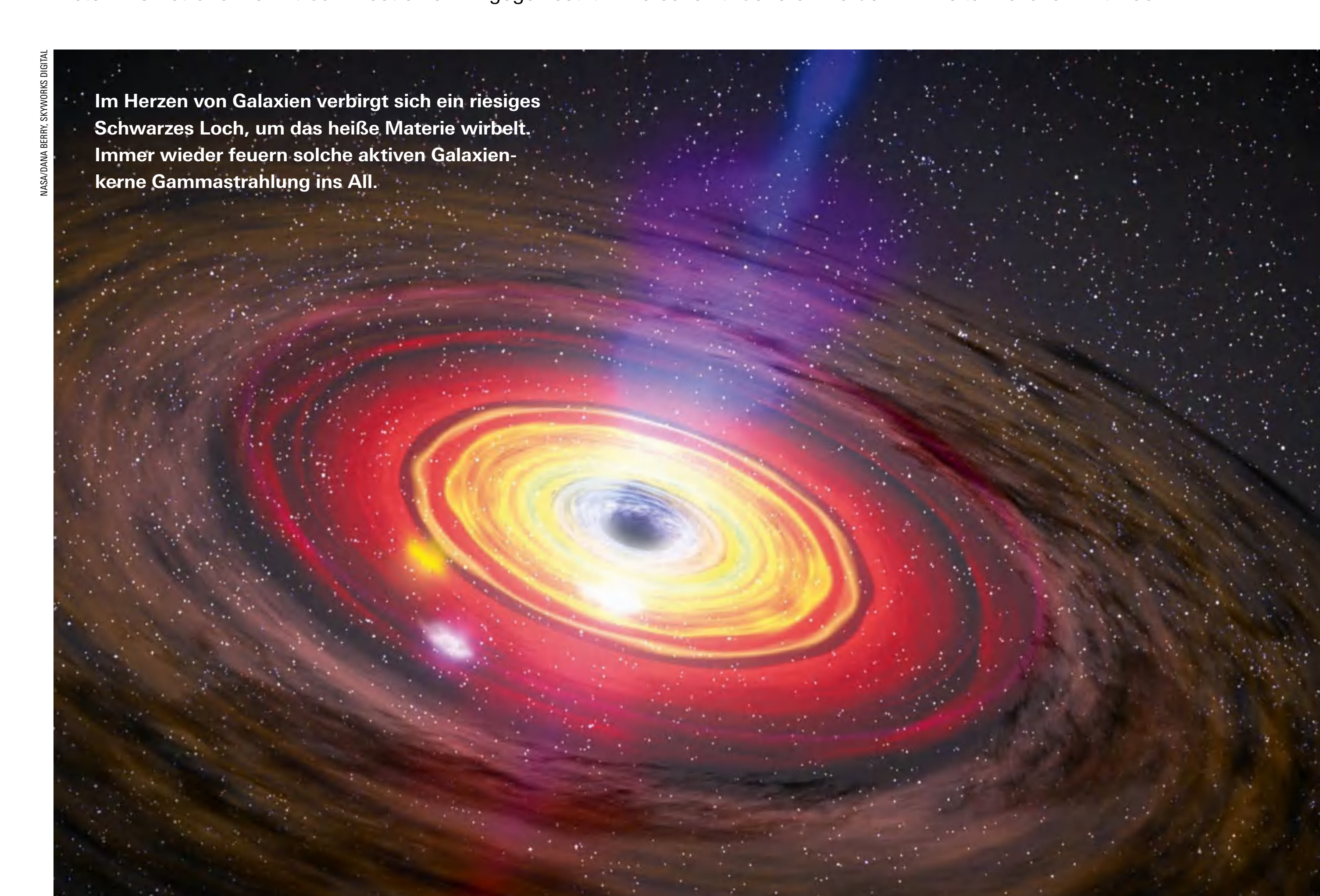
Daneben ermöglichen noch weitere kosmische Boten Einblicke in weit entfernte Regionen des Alls. So werten Astrophysiker beispielsweise die bereits 1912 entdeckte kosmische Strahlung aus, ein Sammelsurium verschiedener Elementarteilchen und Atomkerne, die aus den Tiefen des Alls stammen und ständig auf die Erdatmosphäre einprasseln. Und sie untersuchen Neutrinos aus Gegenden fernab unseres Sonnensystems sowie die 2015 erstmals direkt nachgewiesenen Gravitationswellen.

Kosmische Neutrinos lassen sich am besten in riesigen, unterirdischen Detektoren dingfest machen. Gravitationswellen erfordern mehrere Kilometer lange Laserinterferometer. Die Astronomie mit Gammastrahlen hingegen setzt auf spezielle Teleskope mit einer ausgeklügelten Rekonstruktionstechnik. Während es für Neutrinos und Gravitationswellen bereits große Observatorien gibt, wird nun auch in der Gammaastronomie ein internationales Großprojekt Wirklichkeit: das Cherenkov Telescope Array (CTA). Seine Teleskope sollen Photonen, also Lichtteilchen, aus den Weiten des Kosmos nachweisen, die zig Milliarden Mal mehr Energie haben als sichtbares Licht.

Das ist hilfreich, wenn man die extremsten Regionen im Weltall studieren möchte: Gammaquanten dringen unter anderem aus dem Umfeld explodierender Sterne oder der Nähe supermassereicher Schwarzer Löcher zur Erde. Wer sie auffangen will, sieht sich allerdings mit einem Problem konfrontiert: Hochenergetische Strahlung kann den Erdboden nicht erreichen, denn sie wird von der Atmosphäre absorbiert. Für Lebewesen auf der Erde ist das erst einmal eine gute Nachricht. Für Astronomen, die sich für diesen Abschnitt des elektromagnetischen Spektrums interessieren, ist es eine Herausforderung.

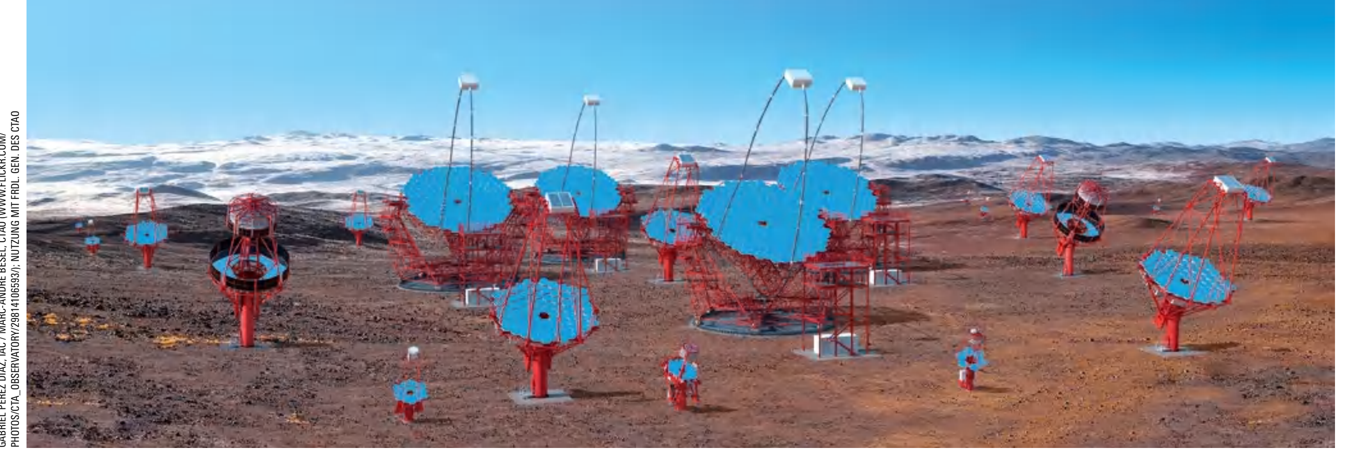
Das Cherenkov Telescope Array wird ausnutzen, dass Gammaquanten, die in der Atmosphäre absorbiert werden, Lawinen so genannter Sekundärteilchen lostreten. Bei ihrem Weg durch die Atmosphäre lassen diese die Luft kurz aufleuchten. Mit den Teleskopen von CTA können wir solche extrem schwachen Lichtblitze beobachten – und damit die Energie und Herkunft der Gammaquanten rekonstruieren (siehe »Die Physik der Teilchenkaskaden«, S. 17).

Indem wir den Himmel nach Quellen derartiger energiereicher Quanten absuchen, können wir letztlich einen Blick auf das Universum werfen, wie es im Gammalicht erscheint. Generell werden im Weltall Teilchen mit wach-



NASA/DANA BERRY, SKYWORKS DIGITAL

Im Herzen von Galaxien verbirgt sich ein riesiges Schwarzes Loch, um das heiße Materie wirbelt. Immer wieder feuern solche aktiven Galaxienkerne Gammastrahlung ins All.



GABRIEL PÉREZ DIAZ, IAC / MARC-ANDRÉ BESEL, CTAO (WWW.FLICKR.COM/PHOTOS/CTA_OBSERVATORY/29814106593/); NUTZUNG MIT FRDL. GEN. DES CTAO



AKIRA OKUMURA (WWW.FLICKR.COM/PHOTOS/CTA_OBSERVATORY/44330523155/); NUTZUNG MIT FRDL. GEN. DES CTAO

Das Cherenkov Telescope Array in Chile wird aus Teleskopen unterschiedlicher Größe bestehen (siehe Computeranimation oben). Eines der Teleskope haben die Forscher bereits eingeweiht (rechts). Es steht auf La Palma, dem zweiten Standort des Observatoriums.

sender Energie immer seltener. In der Gammaastronomie interessieren wir uns für Strahlungsquanten mit mehreren Billionen Elektronvolt, Physiker sprechen hier von Teraelektronvolt oder schlicht TeV. Die Größenordnung entspricht ungefähr der Energie, mit welcher der weltgrößte Teilchenbeschleuniger am Genfer Kernforschungszentrum CERN Atomkerne aufeinanderfeuert.

Im Weltall sind Atomkerne und Lichtquanten mit dieser Energie nichts Ungewöhnliches, aber man muss genau hinsehen: Auf jedes TeV-Quant kommen tausende Quanten mit einer 1000-fach niedrigeren Energie von einer Milliarde Elektronvolt (Gigaelektronvolt oder GeV). Bei vielen Strahlungsquellen ist das Verhältnis sogar noch kleiner; verzehnfacht man die Energie der Quanten, sinkt deren Häufigkeit um den Faktor 30 bis 100.

Ein Detektor für TeV-Strahlungsquanten braucht daher eine Nachweisfläche von der Größe mehrerer Fußballfelder, um überhaupt einige der seltenen Teilchen aufzufangen. Das veranschaulicht, wieso man ein Messinstrument für TeV-Gammaquanten nicht im Erdorbit, oberhalb der störenden Atmosphäre, platzieren kann. Dort schwebt zwar mit dem NASA-Satelliten Fermi ein sehr erfolgreiches Gerät für den Nachweis von kosmischen Gammastrahlen. Es dient jedoch der Beobachtung im GeV-Bereich, wo pro Quadratmeter deutlich mehr Teilchen auftreffen als im TeV-Bereich.

Kaskaden geladener Teilchen lassen die Atmosphäre kurz aufleuchten

Auf dem Erdboden muss man hingegen Techniken für die Beobachtung der Teilchenlawinen entwickeln, die Gammaquanten in der Atmosphäre lostreten. Der Nachweis der Kaskadenteilchen selbst – Elektronen und ihre positiv geladenen Antiteilchen – ist nicht ganz einfach, denn nur die wenigsten dieser Partikel schaffen es bis zum Erdboden. Eine Möglichkeit ist, riesige Felder von Teilchendetektoren in 4000 bis 5000 Meter Höhe aufzubauen und damit zumindest noch einige Ausläufer der Kaskade nachzuweisen. Ein Beispiel für ein solches Instrument ist der HAWC-Detektor in Mexiko.

Einen anderen Weg schlagen so genannte Cherenkov-Teleskope ein, die sich in den vergangenen Jahrzehnten zu einer sehr erfolgreichen Technik entwickelt haben. Sie fangen die blauen Lichtblitze auf, welche die »Sekundärteilchen« bei ihrem Weg durch die Atmosphäre abstrahlen. Dieses so genannte Cherenkov-Licht ist in Flugrichtung gebündelt (siehe »Analogon eines Überschallknalls«, S. 18) und beleuchtet auf dem Boden eine Fläche von etwa 250 Meter Durchmesser. Steht dort ein Cherenkov-Teleskop, kann es die Leuchtspur der Kaskade am Himmel fotografieren und anhand des Bildes Richtung und Zahl der beteiligten Sekundärteilchen bestimmen. Daraus lassen sich Ankunftsrichtung und Energie des Gammaquants rekonstruieren, das die Teilchenlawine ausgelöst hat.

Allerdings ist das Cherenkov-Leuchten nur für einige milliardstel Sekunden sichtbar und außerdem sehr lichtschwach – im TeV-Energiebereich erreichen pro Quadratmeter nur wenige blaue Lichtquanten den Boden. Um dennoch ein Bild der Kaskade aufnehmen zu können, braucht man neben einer großen Sammelfläche und einem sehr dunklen Nachthimmel auch leistungsfähige Elektronik, die Bilder mit kurzer Belichtungszeit anfertigen kann.

Astronomen haben die nötigen Techniken in den vergangenen 50 Jahren immer weiter verbessert. Den Anfang machte 1968 das Cherenkov-Teleskop Whipple in Arizona. Seit Beginn der 2000er Jahre haben dann seine Nachfolger große Fortschritte gebracht: H.E.S.S. in Namibia, MAGIC auf der Kanareninsel La Palma und VERITAS in Arizona. Sie bestehen mittlerweile jeweils aus zwei bis fünf zusammengeschalteten Teleskopen. In ihnen fokussieren Spiegel, die denen von optischen Teleskopen ähneln, das Cherenkov-

Licht auf eine Fokalebene, in der 1000 und mehr Photomultiplier die Signale im Rhythmus weniger milliardstel Sekunden aufzeichnen. Zeigt solch ein Bild eine Lichtspur, wird es vom Datenerfassungssystem gespeichert. Die anderen Aufnahmen verwirft der Computer hingegen, da der rohe Informationsfluss von mehreren Terabyte pro Sekunde nicht beherrschbar wäre.

Um nun ein Bild einer spannenden Region am Nachthimmel anzufertigen, müssen Astronomen nicht nur ein Gammaquant aufspüren, sondern möglichst viele. Dafür brauchen sie einen langen Atem: Für typische kosmische Strahlungsquellen fällt pro Jahrzehnt bloß ungefähr ein TeV-Quant auf einen Quadratmeter der Atmosphäre; für die aktuellen Teleskope entspricht das – dank ihrer größeren Nachweisfläche – einigen Gammaquanten pro Nacht. Das fertige Bild einer Region besteht oft bloß aus 100 bis 1000 der rekonstruierten Lichtteilchen. Zum Vergleich: Die Bilder, die wir Sekunde für Sekunde mit unseren Augen sehen, sind aus Milliarden Photonen zusammengesetzt.

Eine weitere Schwierigkeit besteht darin, dass neben den Gammaquanten ebenso die viel häufigeren Atomkerne der kosmischen Strahlung Teilchenkaskaden in der Atmosphäre auslösen. Sie flitzen in großen Mengen quer durchs Weltall und erreichen die Erde aus allen Richtungen. Typische Cherenkov-Teleskope registrieren daher Hunderte solcher Lawinen pro Sekunde. Glücklicherweise unterscheiden sich diese Bilder ein wenig von denen, die auf Gammalicht zurückgehen. Die Kaskaden von letzteren sind etwas schmaler, weshalb man sie aus dem Heuhaufen anderer Bilder herausfiltern kann.

Als Durchbruch der Cherenkov-Teleskope gilt der erstmalige Nachweis einer kosmischen Quelle von TeV-Strahlung durch das Whipple-Teleskop im Jahr 1989: des Krebsnebels. In der rund 6000 Lichtjahre entfernten Region ereignete sich einst eine Sternexplosion, deren Licht die Erde im Jahr 1054 erreichte. Heute gleicht die Gegend einem weiträumigen Nebel, der sich infolge der durch die Supernova freigesetzten Energie nach wie vor ausdehnt.

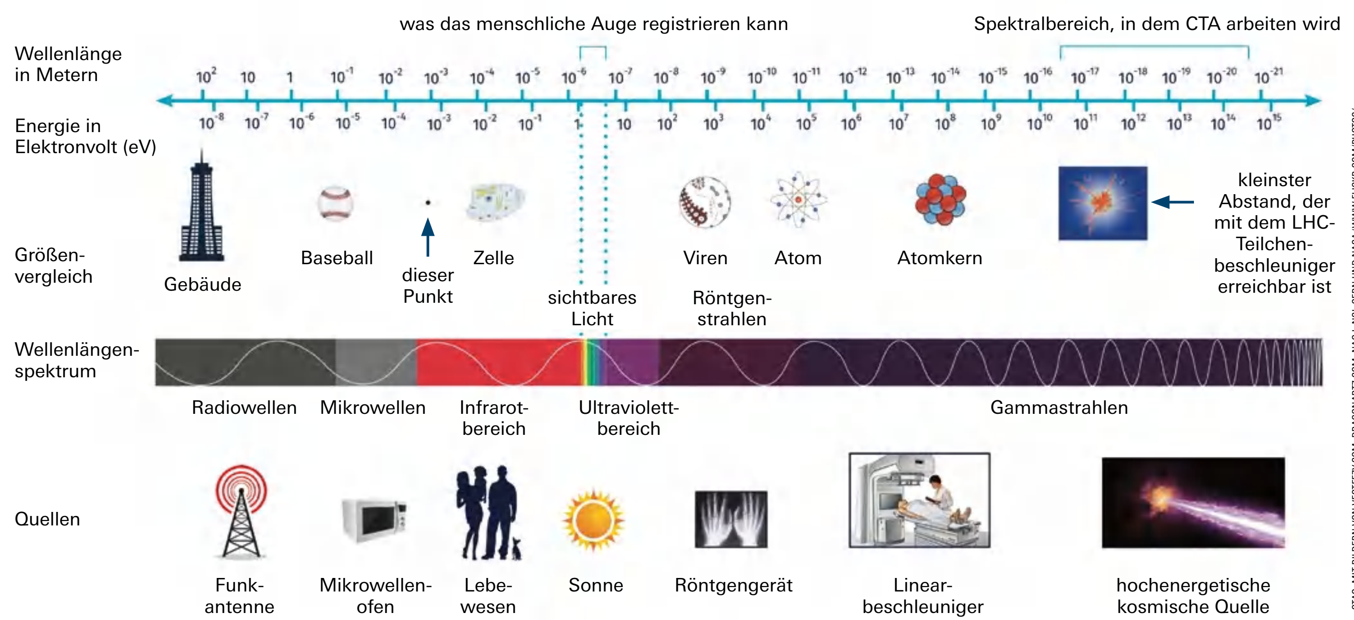
In den 20 Jahren vor der Beobachtung hatte das Team um den Pionier Trevor Weekes die nötigen Techniken immer weiter verbessert. Damit ließ der nächste Erfolg nicht lange auf sich warten: 1992 entdeckte Whipple die zweite Quelle für kosmische Gammastrahlung, die aktive, 500 Millionen Lichtjahre entfernte Galaxie Mrk 421.

Damit hatte Weekes' Team bereits zwei typische Quellen für kosmische Gammastrahlung aufgespürt. Mit Hilfe von H.E.S.S., MAGIC und VERITAS sind etliche weitere hinzugekommen, heute sind etwa 200 bekannt. Rund die Hälfte befinden sich in unserer Milchstraße (siehe Bild S. 19), bei den restlichen handelt es sich um supermassereiche Schwarze Löcher in den Kernen anderer Galaxien.

Gammastrahlung verrät, wo im Weltall Atomkerne extrem stark beschleunigt werden

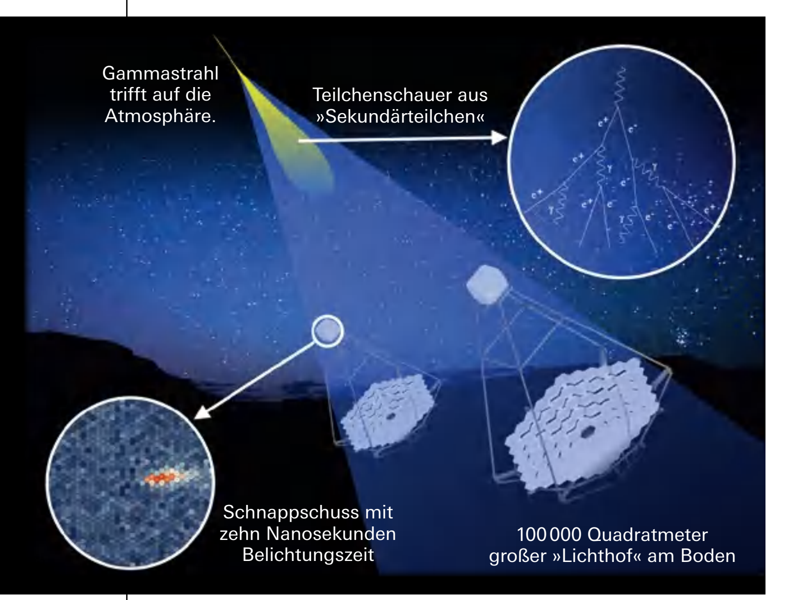
Dass es so viele Quellen gibt, war auf den ersten Blick überraschend. Gammalicht kann nicht einfach von sehr heißen Objekten stammen wie der Großteil der sonstigen Strahlung, die wir aus dem Weltall auffangen. Sterne beispielsweise sind bei Weitem nicht heiß genug, um TeV-Quanten als thermische Strahlung abzugeben. Auch sonst kennen wir keine Himmelskörper, die sie als Wärmestrahlung abgeben. Ferner unterscheiden sich die Energiespektren der bekannten Gammaquellen deutlich von dem charakteristischen Spektrum eines heißen Körpers.

Andererseits war schon länger bekannt, dass es Phänomene im Universum geben muss, die Teilchen mit sehr hohen Energien ausstatten – weit jenseits der thermischen



Gammastrahlen sind elektromagnetische Wellen mit einer extrem kurzen Wellenlänge. Die zu den Wellen korrespondierenden Quanten tragen sehr viel Energie – deutlich mehr als die von Radiowellen, sichtbarem Licht oder Röntgenstrahlen.

CTAO; MIT BILDERN VON VECTEEZY.COM, DRAGONARTZ.COM, NAOJ, NCI, CERN UND NASA (WWW.FLICKR.COM/PHOTOS/CTA_OBSERVATORY/29049793913/); NUTZUNG MIT FRDL. GEN. DES CTAO; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT



Die Physik der Teilchenkaskaden

Wenn ein Gammaquant mit einem Luftmolekül der Erdatmosphäre kollidiert, entstehen zwei neue Teilchen: ein Elektron sowie ein Positron (das positiv geladene Antiteilchen des Elektrons), Physiker nennen sie in diesem Kontext »Sekundärteilchen«. Beim Weg durch die Atmosphäre gibt das Duo Energie in Form neuer Gammaquanten ab, die weitere Elektron-Positron-Paare erzeugen. Die so entstehende Lawine setzt sich fort, bis alle Energie aufgebraucht ist. Da der Teilchenschauer die Luft für kurze Zeit aufleuchten lässt, können Forscher die Lawine mit Hilfe spezieller Teleskope fotografieren. Aus ihrer Form können sie dann auf die Herkunftsrichtung des primären Gammaquants schließen, denn die Kaskade breitet sich stets in seine Flugrichtung aus. Aus der Zahl der Sekundärteilchen lässt sich wiederum die Energie des Lichtteilchens rekonstruieren.

R. WHITE (MPIK) / K. BERNLOHR (MPIK) / DESY; NUTZUNG MIT FRDL. GEN. DES CTAO; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Strahlung. Darauf deuteten nicht zuletzt die Teilchen der kosmischen Strahlung hin, die der österreichische Physiker Victor Hess 1912 in einem mit Messgeräten ausgestatteten Ballon über Preußen entdeckt hatte. Wo das Sammelsurium an Atomkernen, Elektronen und Positronen genau herkommt, zählt jedoch bis heute zu den größten Rätseln der Astrophysik. Da sie eine elektrische Ladung haben, werden diese Partikel von interstellaren und intergalaktischen Magnetfeldern abgelenkt; die Information über die Richtung zu ihrer Quelle geht damit verloren.

Mit der Gammaastronomie lässt sich die Frage nach dem Ursprung hochenergetischer Teilchen hingegen beantworten. Denn in den Regionen, in denen sie auf den Weg geschickt werden, entsteht für gewöhnlich auch Gammastrahlung, zum Beispiel wenn stark beschleunigte Teilchen mit Atomkernen des interstellaren Mediums kollidieren. Gammastrahlung reagiert nicht auf Magnetfelder, sie fliegt einfach immer weiter geradeaus.

Man kann aus der Ankunftsrichtung eines Gammaquants also direkt auf seine Herkunftsregion schließen. Dadurch haben wir mittlerweile eine Vorstellung davon, in welchen Regionen die Partikel der kosmischen Strahlung auf so hohe Energien gebracht werden. Ein klassischer Kandidat für solche »kosmischen Beschleuniger« sind die Überreste von Supernova-Explosionen; der von Whipple beobachtete Krebsnebel ist hier das prominenteste Beispiel.

Supernovae schleudern Sternmaterie mit vielen tausend Kilometern pro Sekunde ins All. Wenn das Material auf das umgebene interstellare Medium trifft – das extrem dünne Gas mit wenigen Atomen pro Kubikzentimeter, das den Raum zwischen den Sternen füllt –, wird es abgebremst und das komprimierte Gas beschleunigt. Es entsteht eine Schockfront, die sich tausende Jahre lang ausbreitet.

In einer Art Pingpong-Prozess können Wasserstoffatomkerne oder andere geladene Teilchen immer wieder zwischen der schnell fließenden Sternmaterie auf der einen Seite der Schockfront und dem ruhenden Medium auf der anderen hin- und herreflektiert werden. Bei solch einer Bewegung gewinnen Teilchen mitunter Energie, wie der italienische Physiker Enrico Fermi bereits 1949 berechnet hat (siehe »Das Geheimnis der Schockwellen-Beschleunigung«, S. 20). Kollidieren sie dann mit anderen Partikeln, entstehen so genannte Pionen – kurzlebige Partikel aus einem Quark und einem Antiquark –, die sich laut den Gesetzen der Teilchenphysik binnen Sekundenbruchteilen in Paare aus Gammaquanten umwandeln.

Tatsächlich handelt es sich bei etlichen der am Himmel sichtbaren TeV-Strahlungsquellen um solche Supernova-Überreste. Die Gammaastronomie ermöglicht es, die kosmischen Beschleuniger direkt zu beobachten – und zu messen, bis zu welchen Energien und mit welcher Intensität sie Teilchen beschleunigen. Somit haben wir eine klare Vermutung, woher die Partikel der kosmischen Strahlung ihre hohe Energie beziehen, zumindest mit Blick auf die Milchstraße. Allerdings fehlen uns noch viele Puzzleteile, um das Rätsel endgültig zu lösen. So ist bislang unklar, wie schnell sich beschleunigte Atomkerne, Elektronen und Positronen in unserer Galaxie ausbreiten. Unbekannt ist auch, welchen Einfluss die kosmische Strahlung auf die Entwicklung der Milchstraße hatte und hat. Neue Simulationsrechnungen zeigen zum Beispiel, dass die Struktur und Dicke der galaktischen Scheibe stark von diesen Prozessen beeinflusst worden sein könnte.

Eine ganze Vielzahl an kosmischen Teilchenkanonen

Mit der Zeit haben Astronomen zudem erkannt, dass es neben Supernova-Explosionen noch viele andere kosmische Teilchenschleudern gibt: beispielsweise besonders heiße Sterne, die starke Partikelwinde ins All pusten, sowie das Umfeld von Neutronensternen und Schwarzen

Analogon eines Überschallknalls

Elektrisch geladene Teilchen, die sich in einem Medium mit Brechungsindex n mit einer Geschwindigkeit v bewegen, die größer ist als die Lichtgeschwindigkeit c/n in einem Medium, strahlen kegelförmig blaues Cherenkov-Licht ab. Es handelt sich dabei um das optische Analogon eines Überschallknalls. In der Erdatmosphäre in zehn Kilometer Höhe ($n \approx 1{,}0001$) beträgt der Öffnungswinkel des Cherenkov-Lichts eines nahezu lichtschnellen Teilchens etwa ein Grad, das Licht ist also eng in Flugrichtung des Teilchens gebündelt. Den Effekt kann man auch mit Wasserwellen illustrieren: Eine langsam schwimmende Ente ruft kreisförmige Wellen hervor. Sobald sie schneller schwimmt, als sich die Wellen ausbreiten, erzeugt sie einen Wellenkegel, dessen Öffnungswinkel mit der Geschwindigkeit der Ente variiert.

Löchern. Es gibt auch Gammaquellen, an deren Ort am Himmel in anderen Wellenlängen absolut nichts sichtbar ist, was Teilchen beschleunigen könnte. Möglicherweise sind hier ganz neue Phänomene am Werk. Oder wir haben in der jeweiligen Region den kosmischen Beschleuniger schlicht noch nicht entdeckt, was wahrscheinlicher ist.

Heutige Cherenkov-Teleskope können nur jene Explosionsrelikte beobachten, die maximal einige tausend Lichtjahre von der Sonne entfernt sind, was lediglich einem kleinen Teil der Milchstraße entspricht. Für andere Gammaquellen in unserer Galaxie gelten ähnliche Einschränkungen. Wie viel die bisher bekannten Quellen jeweils zur kosmischen Teilchenstrahlung beisteuern, lässt sich mit den vorhandenen Daten nicht beantworten. Es könnte sogar sein, dass wir die interessantesten Teilchenkanonen in unserer Galaxis bislang gar nicht aufgespürt haben.

Eine besonders spannende Möglichkeit ist, dass Wolken aus Dunkler Materie Gammastrahlung aussenden. Theoretiker sagen voraus, dass zwei Teilchen des hypothetischen Stoffs, der sich praktisch nur über seine Schwerkraft bemerkbar machen soll, bei einer Kollision in normale Elementarteilchen und Gammaquanten zerstrahlen. Vor allem beim Blick ins galaktische Zentrum würde man daher Gammastrahlung mit einem charakteristischen Energiespektrum erwarten. Bisher konnte man solche Strahlung jedoch nicht zweifelsfrei nachweisen – vielleicht sind heutige Instrumente schlicht nicht empfindlich genug dafür.

Offen ist auch, weshalb die Kerne anderer Galaxien so viel Gammastrahlung abgeben und in welchem Maß sie zur kosmischen Teilchenstrahlung, die wir auf der Erde beobachten, beitragen. Diese fernen Welteninseln machen etwa die Hälfte der Quellen aus, die Forscher bisher im Gammalicht aufgespürt haben. Es handelt sich fast durchweg um Galaxien, in deren Kern Materie auf ein Schwarzes Loch mit mehreren Milliarden Sonnenmassen fällt – ganz so, wie es das im April 2019 veröffentliche Bild des Event Horizon Telescope im Fall der Galaxie M87 erstmals direkt zu zeigen scheint (siehe **Spektrum** Juli 2019, S. 42). Galaxienkerne feuern in so einer Situation lichtschnelle »Jets« aus heißer Materie ins All, die sich tausende Lichtjahre weit ausbreiten können. Dabei entstehen ebenfalls Schockwellen; sie sind ideale Orte zur Teilchenbeschleunigung. Möglicherweise sind dies die Regionen, aus denen die kosmische Strahlung mit den allerhöchsten Energien stammt. Sicher ist, dass hier viel Gammastrahlung entweicht. Allerdings versteht man weder den genauen Mechanismus dahinter noch kennt man die Zusammensetzung der Jets.

Die Gammastrahlenastronomie geht darüber hinaus ganz grundlegenden Fragestellungen nach, etwa der, ob die Lichtgeschwindigkeit konstant und unabhängig von der Energie der Lichtquanten ist. Theorien der Quantengravitation besagen, dass bei kleinsten Abständen Raum und Zeit kein glattes Kontinuum mehr darstellen; Licht mit einer sehr kleinen Wellenlänge könnte sich daher langsamer ausbreiten als normales Licht. Bei Gammalicht aus Quellen in Milliarden Lichtjahren Entfernung könnte dieser Effekt zu Tage treten. Tests mit den bestehenden Teleskopen sind jedoch noch nicht genau genug, um Näheres sagen zu können.

Bei diesen und anderen Fragen soll das Cherenkov Telescope Array wesentliche Fortschritte bringen. Dafür muss es existierende Gammateleskope in Sachen Leistungsfähigkeit deutlich übertreffen. So soll CTA eine erheblich größere Nachweisfläche für Gammaquanten aufweisen und damit mehr Teilchenschauer beobachten können. Auch soll es die Genauigkeit der Rekonstruktion verbessern und entsprechend höher aufgelöste Bilder liefern. Außerdem wollen wir den Energiebereich erweitern und Quanten zwischen 20 GeV und 300 TeV nachweisen.

Am besten kann man diese Ziele erreichen, indem man viele Teleskope über eine große Fläche verteilt; bei CTA sollen es bis zu 99 auf knapp zehn Quadratkilometern werden. Bei der Wahl der Teleskope gilt es allerdings abzuwägen: Um sehr lichtschwache Teilchenkaskaden detektieren zu können, müssen einige der Teleskope sehr groß sein, am besten wären Spiegelflächen von 400 Quadratmetern. 100 solcher Teleskope zu bauen, wäre aber viel zu teuer.

Ein Mix aus großen, mittleren und kleinen Teleskopen, verteilt auf Nord- und Südhalbkugel

Glücklicherweise benötigen wir die große Gesamtfläche vor allem, um Gammaquanten mit den höchsten Energien nachzuweisen, da sie besonders selten sind. Die dazugehörenden Kaskaden geben jedoch vergleichsweise viel Cherenkov-Licht ab, das man auch mit kleineren Teleskopen nachweisen kann.

Analytische Rechnungen und langwierige Computersimulationen haben gezeigt, dass eine Kombination aus drei Teleskoptypen das beste Preis-Leistungs-Verhältnis verspricht. CTA wird daher zum einen aus wenigen großen Teleskopen mit knapp 400 Quadratmeter Spiegelfläche bestehen (Large-Sized Telescope, LST), die primär Energien von 20 bis zu einigen hundert GeV abdecken. Zum anderen wollen wir mittelgroße Teleskope mit zirka 100 Quadratme-

ter Spiegelfläche bauen (Medium-Sized Telescope, MST), für den Bereich von 100 GeV bis zu etlichen TeV.

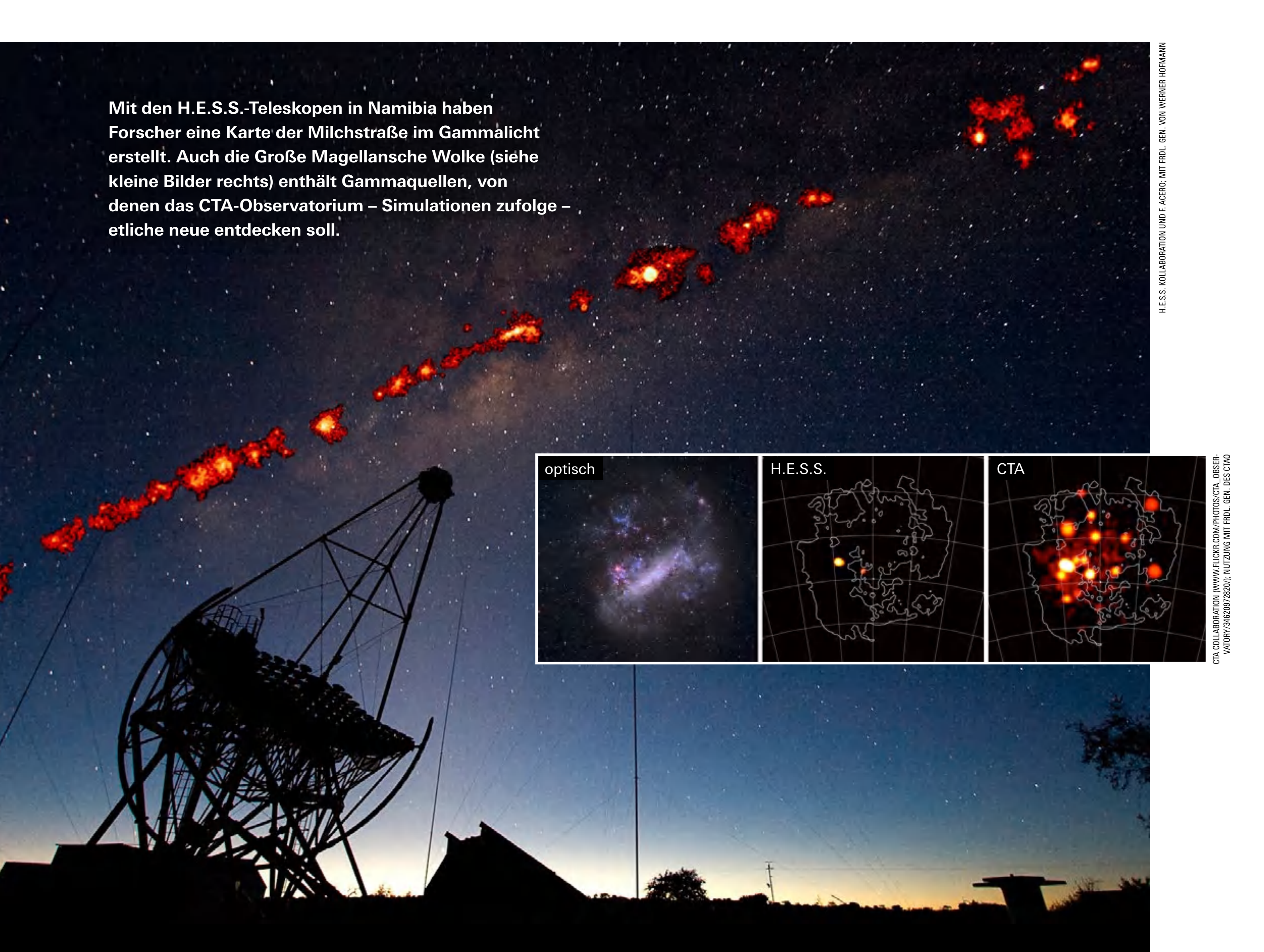
Den energiereichsten Quanten soll hingegen ein Heer an vergleichsweise kleinen Teleskopen (Small-Sized Telescope, SST) nachspüren. Eine weitere Besonderheit: CTA soll den Himmel an zwei Standorten in Augenschein nehmen. Zum einen auf dem Gelände des Observatoriums Roque de los Muchachos auf La Palma, zum anderen auf dem Gebiet der Europäischen Südsternwarte ESO in der chilenischen Atacama-Wüste. Dort wird es auf einem Hochlandtal zwischen den ESO-Teleskopen auf dem Cerro Paranal und dem neuen Extremely Large Telescope (ELT) der ESO auf dem Cerro Armazones stehen.

Mit Teleskopen auf der Nord- und der Südhalbkugel können wir den gesamten Nachthimmel studieren und sind nicht nur auf eine Hemisphäre beschränkt. Die Anforderungen der Standorte entsprachen dabei denen optischer Observatorien: ein klarer und dunkler Nachthimmel, möglichst in einer Höhe zwischen 1500 und 2500 Metern. Dort benötigt man eine große und ebene Fläche, und es muss eine hinreichende Infrastruktur mit Zugangsstraßen, Stromversorgung und Datenübertragung möglich sein.

Das Teleskopsystem im Süden wird aus vier großen, 25 mittleren und 70 kleinen Teleskopen bestehen, das im Norden aus vier großen und 15 mittleren. Das erscheint uns sinnvoll, weil man bei den höchsten nachweisbaren Gammaenergien, für die kleine Teleskope benötigt werden, primär Strahlungsquellen in unserer Galaxis erwartet; diese stehen aber hauptsächlich auf der Südhalbkugel am Nachthimmel. Daher kann man – wieder unter dem Gesichtspunkt der Kostenoptimierung – auf die kleinsten Teleskope im Norden verzichten.

Mit Prototypen testen wir die Entwürfe für die CTA-Teleskope. Bei den kleinen SST-Teleskopen gibt es gleich drei verschiedene Designs; zwei davon haben eine neuartige »Schwarzschild-Couder«-Optik, bei der ein Sekundärspiegel Verzerrungen reduziert und das Licht auf einen relativ kompakten Sensor fokussiert, und kürzlich fiel die Entscheidung zu Gunsten dieser neuen Optik. Alle drei Entwürfe nutzen erstmals in großem Stil Lichtsensoren aus Silizium, die anders als die in Fotoapparaten eingesetzten Sensoren einzelne Cherenkov-Lichtquanten nachweisen können. Auch für das mittelgroße Teleskop erproben wir zwei Technologien: das klassische Ein-Spiegel-Design, in dessen Fokalebene etwa 2000 Lichtvervielfacher angeordnet sind, und einen Schwarzschild-Couder-Zweispiegler mit mehr als 11000 Silizium-Pixeln.

Einen Prototyp der großen LST-Teleskope haben wir bereits im Oktober 2018 auf La Palma eingeweiht, er soll das erste richtige CTA-Teleskop werden. Sein Rahmen



Mit den H.E.S.S.-Teleskopen in Namibia haben Forscher eine Karte der Milchstraße im Gammalicht erstellt. Auch die Große Magellansche Wolke (siehe kleine Bilder rechts) enthält Gammaquellen, von denen das CTA-Observatorium – Simulationen zufolge – etliche neue entdecken soll.

H.E.S.S. KOLLABORATION UND F. ACERO; MIT FRDL. GEN. VON WERNER HOFMANN

CTA COLLABORATION (WWW.FLICKR.COM/PHOTOS/CTA_OBSERVATORY/34620972820/); NUTZUNG MIT FRDL. GEN. DES CTAO

Das Geheimnis der Schockwellen-Beschleunigung

Wie werden Teilchen im Weltall zu sehr hohen Energien hin beschleunigt? Eine wichtige Rolle spielt ein Mechanismus an Schockfronten von Supernova-Explosionen, der von dem Physiker Enrico Fermi erdacht wurde, die so genannte Fermi-Beschleunigung. Man kann ihr Prinzip am besten verstehen, wenn man sich einen Ball vorstellt, der elastisch zwischen zwei Wänden hin- und herspringt, wobei sich Wand A auf Wand B zubewegt. Der Ball erhält jedes Mal, wenn er von Wand A abspringt, einen kräftigen Schubs in Richtung Wand B. Die Wände haben kleine Löcher, weshalb der Ball irgendwann durch eine der Barrieren hindurchschlüpfen kann. Etwas Ähnliches passiert im Umfeld von Sternen, die in einer Supernova explodiert sind: Die Explosion hat hier Materie mit Geschwindigkeiten von einigen tausend Kilometern pro Sekunde ins All geschleudert. Sie stößt früher oder später auf ruhende Materie im umliegenden Weltall und schiebt diese wie ein Schneepflug immer weiter zusammen. Die Grenzregion zu diesem interstellaren Medium und die Schockfront der Supernova bilden also Barrieren. Letztere bewegt sich sehr schnell und ist von Magnetfeldern umgeben. Diese können geladene Atomkerne ablenken und reflektieren – ganz so wie eine Wand, die einen Ball abprallen lässt. Hin und wieder schlüpfen Atomkerne, die mehrfach hin- und hergeworfen wurden, durch eine der Barrieren. Stoßen sie dann mit anderen Teilchen zusammen, entstehen Gammaquanten mit sehr hoher Energie.

besteht aus Kohlefaser und Stahl. Wegen dieser leichten Bauweise können wir das Gerät in lediglich 20 Sekunden an eine beliebige Stelle am Himmel drehen, was sehr hilfreich ist, wenn man schnell vorübergehende Himmelserscheinungen beobachten will. Bei ihm und den anderen Typen werden die Hauptspiegel übrigens aus vielen Einzelspiegeln bestehen, vornehmlich aus Kostengründen. Beim LST können wir damit jedoch auch Verformungen der nicht ganz so steifen Trägerstruktur nachjustieren.

Das Cherenkov Telescope Array stellt auch insofern einen Paradigmenwechsel in diesem Feld der Astronomie dar, als es erstmals als echtes Observatorium betrieben wird. Die jetzigen Teleskopsysteme wie H.E.S.S., MAGIC und VERITAS wurden jeweils von einer geschlossenen Gruppe von Wissenschaftlern gebaut und betrieben. Für Beobachtungsvorschläge anderer Forscher sind die Experimente nur begrenzt zugänglich, und die Analyse und Aufarbeitung der Daten erfordern eine lange Einarbeitungszeit.

CTA hingegen soll der ganzen wissenschaftlichen Community offenstehen, ähnlich wie etwa das Submillimeter-Observatorium ALMA. Personal in den jeweiligen Ländern soll die Systeme betreiben. Die beobachtenden Astronomen brauchen daher weder vor Ort zu sein noch müssen sie die komplexen Teleskope steuern können. Sie erhalten nach der Beobachtung neben der Software die vorverarbeiteten Daten, um sie zu analysieren. Nach einem Jahr werden alle Daten dann öffentlich zugänglich gemacht.

Auch die rechtliche Organisation ist ein Novum für uns: Die Planung des Baus von CTA übernimmt eine eigens gegründete gemeinnützige GmbH. Diese soll in einem Europäischen Infrastruktur-Konsortium (ERIC) aufgehen, einer von der Europäischen Kommission speziell für den Betrieb großer Forschungsinfrastrukturen geschaffenen Rechtsform.

Zu den Gründungsmitgliedern des ERIC werden unter anderem Deutschland, Frankreich, Italien, Spanien, Polen und die Schweiz zählen. Weitere europäische und außereuropäische Länder wollen sich am Bau beteiligen; Japan hat beispielsweise bereits große Beiträge zugesagt. Nach den ersten Planungen im Jahr 2006 sind mittlerweile zirka 1500 Wissenschaftler und Ingenieure aus 31 Ländern beteiligt. 2020 wollen wir mit dem offiziellen Bau beginnen, 2025 hoffen wir den wissenschaftlichen Betrieb aufnehmen zu können.

In den ersten Jahren werden die CTA-Teleskope unsere Galaxie nach neuen Gammaquellen absuchen. Speziell im Zentrum der Milchstraße dürfte es viele spannende Regionen geben. Ein weiterer Schwerpunkt sollen Beobachtungen sein, die wir mit anderen Observatorien koordinieren. So wollen wir mächtige Strahlungsausbrüche im Kosmos besser verstehen, wobei es enorm hilfreich ist, die relevanten Himmelsregionen in verschiedenen Wellenlängenbereichen zu beobachten.

CTA wird hierzu einen großen Beitrag leisten: Mit ihm werden Astronomen sehr weit entfernte Regionen des Weltalls gewissermaßen mit neuen Augen sehen – und so die durch Neutrinos, Gravitationswellen und andere Strahlungsarten gewonnenen Einblicke auf eindrucksvolle Weise ergänzen. Insgesamt können wir uns also auf einen neuen Blick auf unser Universum freuen. Ein Blick, der sicherlich dabei helfen wird, die extremsten Prozesse im Weltall besser zu verstehen und die dort geltenden Naturgesetze weiter zu entschlüsseln. ◂

QUELLEN

H.E.S.S. Collaboration: The H.E.S.S. galactic plane survey. Astronomy & Astrophysics 612, 2018

Hinton, J.A., Hofmann, W.: Teraelectronvolt astronomy. Annual Review of Astronomy and Astrophysics 47, 2009

Weekes, T.C. et al.: Observation of TeV gamma rays from the Crab Nebula using the Atmospheric Cerenkov Imaging Tecchnique. Astrophysical Journal 342, 1989

Lesen Sie hier den ganzen Artikel:
www.menschenimfocus.de

Mit Weitblick voran.

Das Zukunftsbild des Toby Walsh im FOCUS.

WISSEN

Verführerischer Diener
Kindchenschema runder Kopf und große Augen: Ob Roboter so niedlich wie Pepper aussehen sollten, ist unter Experten umstritten

Pfleger, Unterhalter, Freund?
Humanoide „Companion Robots" (Roboter-Gefährten) wie Pepper sind bereits in Altenheimen und auf Kinderkrebsstationen im Einsatz

Fotos: Pauline Hildesheim für FOCUS-Magazin

FOCUS 28/2019

TECHNIK

„In 40 Jahren ist künstliche Intelligenz klüger als der Mensch. Wir müssen ihr rechtzeitig Moral beibringen"

Der Informatiker und Computer-Philosoph **Toby Walsh** über unsere Zukunft im Zeitalter des Algorithmus

Hand in Hand
Walsh im Open Lab der Technischen Universität Berlin. Dort erforschen Wissenschaftler das Zusammenspiel von Mensch und Roboter

FOCUS 28/2019

Menschen im



Zyanobakterien, hier während einer Blüte in der Ostsee 2018, machen Stickstoff für andere Organismen nutzbar.

NASA EARTH OBSERVATORY, JOSHUA STEVENS AND LAUREN DAUPHIN (EARTHOBSERVATORY.NASA.GOV/IMAGES/92462/SUMMER-BLOOMS-IN-THE-BALTIC-AND-BARENTS)

BIOGEOCHEMIE

OZEANISCHE WÜSTEN BINDEN GROSSE MENGEN STICKSTOFF

Durch die Ozeanerwärmung breiten sich sauerstoffarme Zonen aus. Dort gehen stickstoffhaltige Nährstoffe verloren, die für Algen lebenswichtig sind. Ein Computermodell verrät nun, wo und in welchem Ausmaß Stickstofffixierer die Verluste wieder ausgleichen.

Mikroskopische Algen, das so genannte Phytoplankton, bilden die Basis der marinen Nahrungspyramide. Um zu wachsen, benötigen die winzigen Organismen Stickstoff und Phosphor in einer für sie verwertbaren Form. Daher bestimmt die Verfügbarkeit von Nitrat (NO_3^-) und Phosphat (PO_4^{3-}) unter anderem, wie viele Fische im Ozean leben oder wie viel CO_2 Algen binden und als organisches Material in die Tiefsee verfrachten.

Phosphat zirkuliert entweder in gelöster Form (anorganisches Phosphat) oder organisch gebunden im Meer und bleibt damit für alle Lebewesen verfügbar. Dahingegen können Nitrat und andere Stickstoffverbindungen »verloren« gehen: Spezielle Bakterien nutzen diese in Sedimenten und sauerstoffarmen Wasserschichten für ihren Energiestoffwechsel und wandeln sie dabei in molekularen Stickstoff (N_2) um, der für die meisten Lebewesen wertlos ist.

Nicht aber für solche aus der Gruppe der Zyanobakterien: Sie besitzen das Enzym Nitrogenase, mit dem sie das äußerst stabile Molekül aufbre-

chen und in Ammoniak (NH_3) umwandeln. Damit bauen sie zum Beispiel Aminosäuren auf. Sterben sie, recyceln Bakterien deren Biomasse und reichern das Meerwasser mit Nitrat an. Auf diese Weise führen die Zyanobakterien dem Ozean wieder Nährstoffe zu. Organismen, die das Element so zu einer nützlichen Form umsetzen, bezeichnet man als Stickstofffixierer.

Auch wenn dieser Kreislauf einleuchtend klingt, ist es schwierig herauszufinden, wo in den Ozeanen welche dieser Prozesse ablaufen. Rund ein Drittel des Nährstoffverlusts durch die Bildung von N_2 geht auf das Konto tropischer Sauerstoffminimumzonen. Diese als Todeszonen bezeichneten Gebiete erstrecken sich in 100 bis 1000 Meter Tiefe, vor allem im Ostpazifik und im Indischen Ozean, und dehnen sich durch die Erwärmung der Meere weltweit aus (**Spektrum** November 2018, S. 58). Fachleute befürchten, dass die Ozeane dadurch immer mehr der essenziellen Substanzen verlieren könnten. Weil das nährstoffarme Tiefenwasser irgendwann an die Oberfläche gelangt, würde dann dort weniger Plankton gedeihen.

Unklar ist, ob Stickstofffixierung diesen Verlust in den Todeszonen wieder wettmacht. Es ist aufwändig zu messen, wo und in welchen Mengen Zyanobakterien das Element in eine für andere Lebewesen nutzbare Form umwandeln, denn die Mikroorganismen besiedeln gewaltige Meeresflächen, und ihre Aktivität schwankt stark nach Ort und Jahreszeit.

Landkarte für den Stickstoffkreislauf im Ozean erstellt

Nun hat ein Forschungsteam berechnet, wie sich N_2-Bindung und -Produktion geografisch verteilen, und eine Bilanz für den globalen Ozean erstellt. Wei-Lei Wang von der University of California in Irvine und seine Kollegen zeigten in ihrer Studie, dass das Element vor allem in den nährstoffarmen subtropischen Wirbeln fernab der Kontinente im Atlantik sowie im zentralen und westlichen Pazifik gebunden wird. In diesen riesigen »Wüsten der Meere« wächst im Vergleich zu Küstengewässern wenig Plankton. Während in den küstennahen Todeszonen des Ostpazifiks und des Indischen Ozeans Nährstoffe abhandenkommen, werden im subtropischen Atlantik und Westpazifik also große Mengen gewonnen.

Eine folgenreiche Erkenntnis: Denn für eine ausgeglichene Stoffbilanz müssen Strömungen die Stickstoffverbindungen umverteilen. So produziert der Atlantik nach den Untersuchungen der Wissenschaftler einen deutlichen Überschuss und exportiert etwa ein Drittel davon in andere Ozeane.

Zudem bedeute solch ein räumlich entkoppelter Kreislauf, dass dieser durch Umwelteinflüsse leichter aus dem Gleichgewicht geraten könne als bislang angenommen, schreiben die Forscher. Sie widersprechen mit ihren Berechnungen auch einer Studie von 2007, laut der am meisten N_2 im Ostpazifik gebunden werde, wo das Wasser aus den Todeszonen nach oben strömt. Die damalige Hypothese: In der Tiefe verwandeln Bakterien gebundenen in molekularen Stickstoff, während Zyanobakterien diesen an der Oberfläche wieder in verwertbare Stoffe umwandeln. So würden steigende Verluste in den Todeszonen direkt vor Ort kompensiert.

Die Ergebnisse der neuen Studie basieren auf einem Computermodell, das den Stickstoff- sowie den Phosphatkreislauf mit Hilfe von Nährstoffdaten aus dem Ozean simuliert und mit den Meeresströmungen verknüpft. Laut den Wissenschaftlern werden dem Ozean derzeit genauso viele stickstoffhaltige Verbindungen hinzugefügt, wie in sauerstofffreien Zonen der Meere verloren gehen. N_2-Fixierung macht dabei mehr als 80 Prozent der Gewinne aus, weitere Quellen sind Flüsse und die Atmosphäre. Die geografische Verteilung, die das neue Modell ausspuckt, stimmt im Gegensatz zur alten Hypothese sehr gut überein mit tatsächlichen Messungen, die Forscher in den vergangenen Jahren im Rahmen von Schiffsexpeditionen gemacht haben.

Während Zyanobakterien also für einen kontinuierlichen Nährstoffnachschub sorgen, leisten sie aber noch einen weiteren Dienst: Im warmen Oberflächenwasser der subtropischen Wirbel fühlen sie sich so wohl, dass sie laut Studie in diesen Regionen neben Stickstoff große Mengen CO_2 binden, das nach ihrem Tod als organischer Kohlenstoff zum Meeresboden sinkt. Für mehr als 30 Prozent des insgesamt dort in die Tiefsee verfrachteten Kohlenstoffs sollen N_2-bindende Organismen verantwortlich sein, im Nordpazifik und im Südatlantik sogar für mehr als die Hälfte. In anderen Gewässern der Subtropen sind Zyanobakterien in ihrem Wachstum limitiert, vor allem durch einen Mangel an Eisen, einem Kofaktor der Nitrogenase. Dagegen hält im Ostpazifik den Autoren zufolge in erster Linie das Zooplankton die Algen in Schach. Insgesamt, so die Hochrechnung der Forscher, ermöglicht Stickstofffixierung den Abtransport von zwölf Petagramm (10^9 Tonnen) Kohlenstoff in die Tiefsee pro Jahr. Das sind acht Prozent des insgesamt zum Meeresgrund verfrachteten Kohlenstoffs.

Ozeanerwärmung bedroht die Bilanz

Die Forscher kommen zu dem Schluss, dass im Meer global betrachtet derzeit ähnlich viele stickstoffhaltige Nährstoffe produziert werden, wie verloren gehen. Allerdings beträgt die Unsicherheit bei ihrer Abschätzung der N_2-Fixierung rund 30 Prozent. Fest steht: Sollten sich die sauerstoffarmen Zonen im Zuge der Ozeanerwärmung weiter ausdehnen und mehr molekularen Stickstoff produzieren, werden Lebewesen wie Zyanobakterien diese Verluste nicht unmittelbar auffangen können. Es würde Jahrzehnte bis Jahrhunderte dauern, ehe die großen Strömungen Nährstoffe umverteilt und ein neues Gleichgewicht im Ozean hergestellt hätten. ◂

Tim Kalvelage ist promovierter Biogeochemiker und Wissenschaftsjournalist in Heidelberg.

QUELLEN

Deutsch, C. et al.: Spatial coupling of nitrogen inputs and losses in the ocean. Nature 445, 2007

Wang, W.-L. et al.: Convergent estimates of marine nitrogen fixation. Nature 566, 2019

MATHEMATIK

DER RIEMANNSCHEN VERMUTUNG AUF DIE PELLE GERÜCKT

Ein längst aufgegebener Ansatz ermöglicht einen neuen Blick auf eines der größten Rätsel der Mathematik. Ob die 160 Jahre alte riemannsche Vermutung dadurch wirklich bewiesen werden könnte, ist allerdings noch unklar.

Die Farben stehen für die Werte der komplexen Zetafunktion, wobei die weißen Punkte ihre Nullstellen kennzeichnen.

Seit über 160 Jahren zählt die riemannsche Vermutung zu einem der härtesten Probleme der Mathematik. Weltweit versuchen sich immer wieder etliche Personen an einem Beweis, doch bisher sind alle gescheitert. Nun sind vier Wissenschaftler einer Lösung erstaunlich nahegekommen – durch einen 90 Jahre alten Ansatz, den die meisten ihrer Kollegen aufgegeben hatten.

Bereits 1900 nannte David Hilbert in seiner berühmten Jahrhundertrede auf dem internationalen Mathematikerkongress in Paris die riemannsche Vermutung als eine der zehn wichtigsten mathematischen Fragestellungen, denen man sich im 20. Jahrhundert widmen müsse. Er soll Überlieferungen zufolge sogar gesagt haben, dass seine erste Frage nach einem 1000-jährigen Schlaf wäre, ob Riemanns Verdacht endlich bestätigt sei.

Von den zehn Problemen sind inzwischen acht zumindest teilweise gelöst. Aber die riemannsche Vermutung erwies sich als hartnäckig, bei ihr gab es bisher kaum Fortschritte. Anlässlich des 100. Geburtstags von Hilberts wegweisender Rede wählte das Clay Mathematics Institute sieben so genannte Millennium-Probleme aus, deren Lösung jeweils mit einer Million US-Dollar belohnt wird. Die riemannsche Vermutung wurde dabei als einziges Problem von Hilberts ursprünglicher Liste übernommen.

Doch warum interessieren sich so viele Personen dafür? Zum einen hat sich in den letzten Jahren herausgestellt, dass etliche andere Theoreme von ihrer Richtigkeit abhängen. Könnte man zeigen, dass Riemann richtiglag, hätte man einen ganzen Rattenschwanz an weiteren Aussagen aus unterschiedlichen mathematischen Bereichen mitbewiesen.

Zum anderen hängt die riemannsche Vermutung mit Primzahlen zusammen, jenen Zahlen, die nur durch eins und sich selbst teilbar sind. Seit Jahrtausenden geben diese »Atome der Mathematik« Wissenschaftlern Rätsel auf. Vor allem möchte man herausfinden, wie sich Primzahlen auf dem Zahlenstrahl verteilen. Auf den ersten Blick scheinen sie zufällig unter den natürlichen Zahlen verstreut zu sein; wenn man jedoch genauer hinsieht, lassen sich gewisse Muster erkennen.

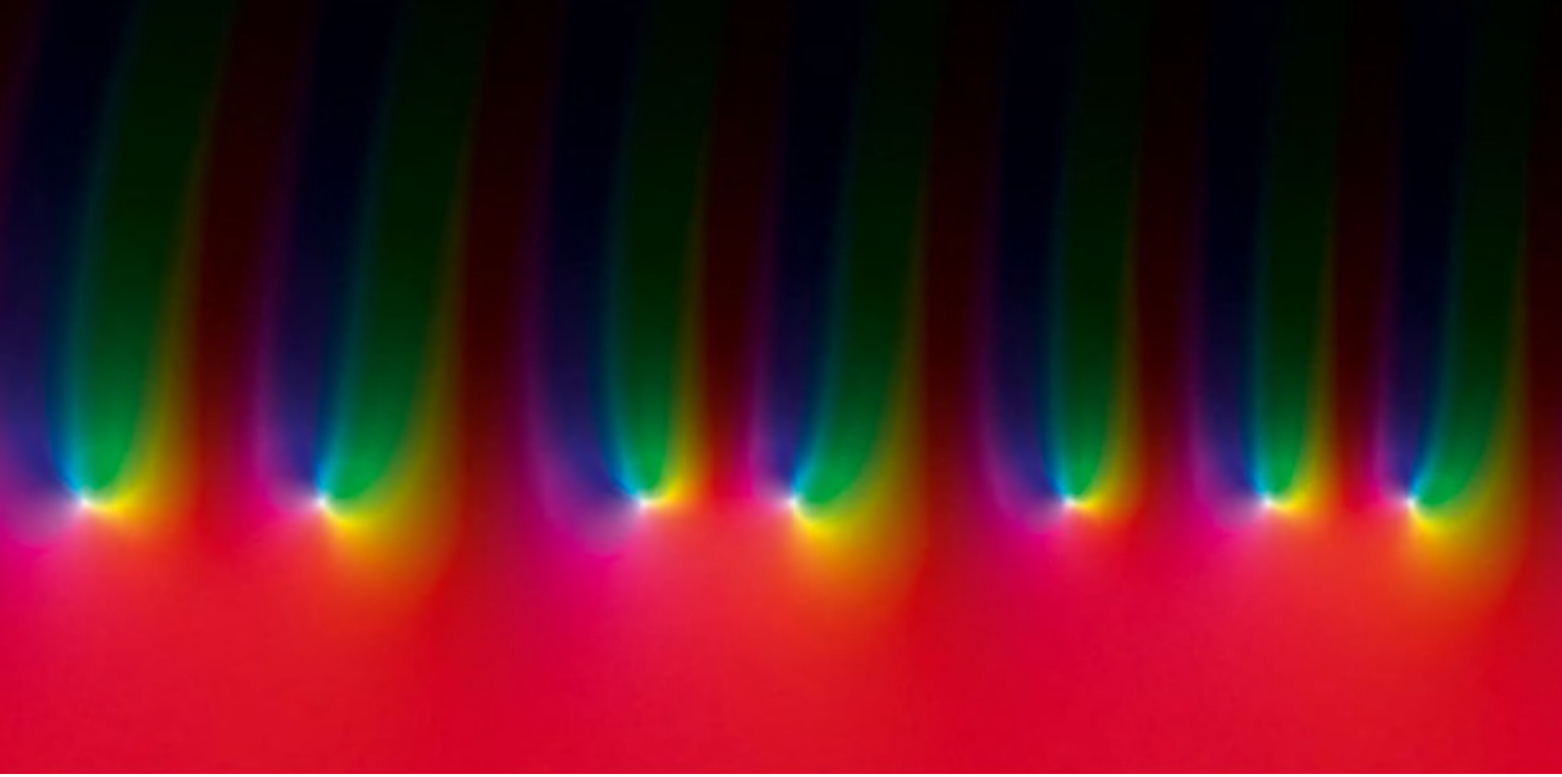
Beispielsweise stellt man schnell fest, dass Primzahlen unter großen Zahlen immer seltener vorkommen. Das scheint auch logisch: Je größer eine Zahl, desto wahrscheinlicher ist es, dass sie sich als Produkt zweier kleinerer Faktoren berechnen lässt.

Primzahlen zählen

Im 19. Jahrhundert versuchte der deutsche Mathematiker Bernhard Riemann herauszufinden, wie viele Primzahlen in verschiedenen Zahlenintervallen vorkommen. Da er sich bis dahin größtenteils mit dem Gebiet der Analysis beschäftigt hatte, in dem es um stetige und differenzierbare Funktionen geht, wählte er auch hier einen solchen Ansatz, um die mysteriösen unteilbaren Zahlen zu untersuchen. Und tatsächlich gelang es ihm, eine so genannte Primzahlfunktion $\pi(x)$ zu definieren, die angibt, wie viele Primzahlen kleiner als x sind. Doch leider lässt sich $\pi(x)$ nicht exakt bestimmen, sondern das Ergebnis enthält einen Fehler, so dass es um die wirkliche Anzahl schwankt.

Das war Riemann natürlich ein Dorn im Auge. Aber wenn es ihm gelingen würde, diese Ungenauigkeiten zu berechnen, dann könnte er daraus bestimmen, wie sich die Primzahlen auf dem Zahlenstrahl verteilen. Als er die Schwankungen genauer betrachtete, fiel ihm auf, dass sie mit den Nullstellen der so genannten Zetafunktion zusammenhängen, die Leonhard Euler bereits im 18. Jahrhundert eingeführt hatte. Somit hatte Riemann sein ursprüngliches Problem verlagert: Er musste nun bloß noch die Werte bestimmen, für die die Zetafunktion null wird, um herauszufinden, wie sich die Primzahlfunktion verhält.

Was einfach klingt, erwies sich als harte Nuss. Zwar erkannte Riemann, dass die Zetafunktion für alle negativen geraden Zahlen verschwindet, allerdings verfügt sie darüber hinaus über unendlich viele weitere »nichttriviale« Nullstellen, die wesentlich komplizierter zu berechnen sind. Alle nichttrivialen Nullstellen, die er fand, haben aber etwas gemeinsam: Sie liegen auf einer Geraden in der komplexen Ebene (siehe Bild oben). Denn anders als Euler setzte Riemann nicht bloß reelle Werte in die Zetafunktion ein, sondern auch komplexe, die Wurzeln aus negativen Zahlen enthal-



JAN HOMANN (COMMONS.WIKIMEDIA.ORG/WIKI/FILE:RIEMANN_ZETA.JPG) / PUBLIC DOMAIN

ten können. Er beobachtete, dass die Nullstellen der Zetafunktion offenbar immer die Summe aus einer komplexen Zahl und ein halb sind. Diese Beobachtung ging als »riemannsche Vermutung« in die Wissenschaftsgeschichte ein.

Inzwischen haben Computer mehrere Milliarden Nullstellen berechnet, und keine wich von der vorhergesagten Form ab. Doch das ist leider kein Beweis dafür, dass die riemannsche Vermutung stimmt. Auch wenn kaum jemand davon ausgeht, könnte ein Wert auftauchen, für den die Zetafunktion verschwindet, der aber nicht die riemannsche Vermutung erfüllt.

Etliche Fachleute haben sich an dem Problem die Zähne ausgebissen; ein Beweis ist bisher noch nicht in Sicht. Deshalb entwickelten Mathematiker unterschiedlichste Umwege, um Riemann zu bestätigen – oder unerwarteterweise zu widerlegen. Mittlerweile haben sie hunderte Probleme gefunden, die äquivalent zur riemannschen Vermutung sind. Könnten sie eines davon lösen, wäre der berühmte Verdacht gleichzeitig mitbewiesen.

Eine der ersten äquivalenten Fragestellungen fand der ungarische Mathematiker György Pólya bereits 1927, als er die Arbeiten seines verstorbenen dänischen Kollegen Johan Jensen durchsah. Dieser hatte eine Folge unendlich vieler – in der Zwischenzeit nach ihm benannter – Polynome definiert, also Ausdrücke der Form $a_nx^n + a_{n-1}x^{n-1} + ... + a_0$. Wie Pólya bemerkte, ist die riemannsche Vermutung gleichwertig mit der Aussage, dass die einzigen Nullstellen der Jensen-Polynome reell sind, das heißt, dass die Lösungen niemals die Wurzel aus minus eins enthalten.

Ungewöhnliches Geschenk

Als Mathematiker versuchten, das von Pólya hervorgebrachte Problem zu lösen, landeten sie schnell in einer Sackgasse. Selbst nach mehreren Jahren intensiver Arbeit konnten sie bloß für Jensen-Polynome vom Grad n kleiner gleich drei (das heißt, drei ist der höchste Exponent, der vorkommt) zeigen, dass sie ausschließlich reelle Nullstellen haben. Frustriert ließen Forscher daher von diesem Ansatz ab, der ihnen zu kompliziert und nicht zielführend vorkam, und wandten sich anderen Ideen zu.

Durch Zufall gelangte das Problem aber 90 Jahre später wieder ins Rampenlicht. 2016 fand eine Konferenz anlässlich des 65. Geburtstags von Don Zagier statt, der am Max-Planck-Institut für Mathematik in Bonn arbeitet. Daran nahm auch Ken Ono von der Emory University in Atlanta teil, der sich eine ganz besondere Überraschung für seinen Kollegen überlegt hatte: Er stellte ihm eine Aufgabe, die viele von Zagiers mathematischen Lieblingsthemen enthielt. Dieser sollte untersuchen, wie sich Polynome, welche die so genannte Euler-Funktion enthalten, in einem bestimmten Grenzwert verhalten. Aus der nach Euler benannten Funktion lässt sich die Anzahl aller Möglichkeiten berechnen, eine Zahl in ihre Summanden aus positiven ganzen Zahlen zu zerlegen; sie spielt eine wichtige Rolle in der Zahlentheorie. »Mir kam die Aufgabe ziemlich schwer vor, und ich hatte nicht erwartet, dass Don wirklich etwas erreichen würde«, sagte Ono laut einer Mitteilung der Emory University. »Aber ihm machte die Herausforderung Spaß, und tatsächlich hatte er schon bald eine Lösung gefunden.«

Als Ono das Ergebnis sah, ließ ihn das Gefühl nicht los, dass sich daraus eine allgemeinere Aussage basteln ließe. Er setzte sich mit seinem Kollegen und zwei seiner damaligen Doktoranden, Michael Griffin und Larry Rolen, zusammen und untersuchte Grenzwerte von weiteren mathematischen Ausdrücken. Sie erkannten, dass sie damit einen neuen Weg gefunden hatten, um die Eigenschaften komplizierter Polynome zu erforschen. Damit lassen sich auch die wenig beachteten Jensen-Polynome beleuchten, weshalb Ono und seine Kollegen das jahrzehntealte Problem von Pólya wieder aufgriffen.

Und tatsächlich erzielten sie ungeahnte Fortschritte, die sie im Mai 2019 veröffentlichten: Sie konnten beweisen, dass alle Jensen-Polynome bis auf endlich viele ausschließlich reelle Nullstellen besitzen. Dazu führte sie die Erkenntnis, dass unendlich viele Jensen-Polynome in einem bestimmten Grenzwert zu »Hermite-Polynomen« werden. Diese Konstrukte tauchen unter anderem häufig in der Quantenmechanik auf und sind daher bestens untersucht. Ono und seine Kollegen haben gezeigt, dass die dort auftretenden Hermite-Polynome reelle Nullstellen haben, wodurch auch unendlich viele Jensen-Polynome diese Eigenschaft besitzen. Zudem bewiesen die vier Mathematiker, dass Pólyas Vermutung für ausnahmslos alle Jensen-Polynome mit einem Grad n kleiner als neun erfüllt ist.

Was viele Wissenschaftler erstaunt, ist, dass die Autoren in ihrer Arbeit keine neuen mathematischen Konzepte oder Objekte entwickelt haben, sondern nur auf etablierte Methoden zurückgriffen. »Jeder Mathematiker kann unseren Beweis überprüfen, man muss dazu kein Experte für Zahlentheorie sein«, meinte Ono.

Auch wenn die Forscher damit nicht die riemannsche Vermutung bewiesen haben, beleuchten sie das Problem doch aus einem anderen Blickwinkel. »Jeder Fortschritt, der in irgendeiner Weise mit der riemannschen Vermutung zusammenhängt, ist faszinierend«, äußerte sich Dimitar Dimitrov von der Universität Saõ Paulo. Die Ergebnisse von Ono und seinen Kollegen sind aber nicht nur in diesem Zusammenhang interessant. Sie könnten sich auf verschiedene Bereiche über die Zahlentheorie hinaus auswirken und dabei helfen, Polynome besser zu verstehen. ◂

Manon Bischoff ist theoretische Physikerin und Redakteurin bei »Spektrum der Wissenschaft«.

QUELLEN

Griffin, M. et al.: Jensen polynomials for the Riemann zeta function and other sequences. PNAS 116, 2019

MEDIZIN

ALZHEIMER ERKENNEN PER BLUTTEST?

Ein neues Verfahren kann die Alzheimerdemenz anhand von Blutproben nachweisen – und zwar schon Jahre, bevor sich erste Symptome zeigen.

▸ Die Alzheimerforschung musste zuletzt empfindliche Rückschläge verkraften. Anfang 2019 brachen die Unternehmen Biogen und Roche große Studien mit den Arzneistoffen Aducanumab und Crenezumab vorzeitig ab, weil diese beiden Antikörper nicht die beabsichtigte Wirkung zeigten. Sie waren gegen ein Proteinbruchstück namens Beta-Amyloid gerichtet, das im Gehirn von Alzheimerpatienten in fehlgefalteter Form auftritt und deshalb zu unlöslichen Aggregaten verklumpt. Die Antikörper sollten dessen Verklumpen im Körper verhindern und so das Fortschreiten der Erkrankung verlangsamen. Diese Hoffnung erfüllte sich nicht.

Der Biophysiker Klaus Gerwert von der Ruhr-Universität Bochum ist dennoch weiterhin von der Wirksamkeit solcher Arzneistoffe überzeugt: »Die Medikamente wirken wahrscheinlich, wenn sie früh genug eingesetzt werden.« Zeige ein Patient bereits Symptome der Alzheimerkrankheit, sei es für einen Einsatz entsprechender Antikörper zu spät, weil sich dann schon zu viel Beta-Amyloid gebildet habe. Daher haben Gerwert und sein Team ein Prüfverfahren entwickelt, das eine frühe Alzheimerdiagnose lange vor dem Austreten erster Krankheitssymptome ermöglichen soll.

Der neue Test nutzt fehlgefaltetes Beta-Amyloid als Indikator dafür, dass eine Erkrankung vorliegt. Auch das so genannte Tau-Protein, das bei Alzheimerpatienten ebenfalls strukturell verändert ist, dient als ein solcher Biomarker. Schon einige Jahre bevor die Symptome auftreten, lagern sich diese Moleküle im Gehirn der Erkrankten ab. Sie dort aufzuspüren, sei bislang aber entweder teuer oder erfordere invasive Eingriffe, wie Juraj Kukolja betont, Chefarzt an der Klinik für Neurologie des Helios-Universitätsklinikums Wuppertal. Hohe Kosten fielen etwa bei einer Bildgebung mit Hilfe der Positronenemissionstomografie (PET) an – und eine Liquorpunktion, also die Entnahme von Hirn- oder Rückenmarksflüssigkeit, um sie auf die Biomarker hin zu prüfen, berge Risiken. Daher seien die heutigen Methoden nicht für flächendeckende Vorsorgetests (Screenings) an symptomfreien Menschen geeignet. Das erschwere Untersuchungen dazu, wie gut neue Arzneistoffkandidaten zur Alzheimerprävention geeignet sind.

Durchlässige Blut-Hirn-Schranke

Ansätze wie die von Gerwerts Team könnten das nun ändern. Als die Forscher ihren neuen Test entwickelten, waren sie zunächst überrascht davon, dass sich Beta-Amyloid überhaupt im Blut nachweisen lässt. Denn die Blut-Hirn-Schranke sollte eigentlich verhindern, dass es aus dem Liquor in den Kreislauf übertritt. Wie man heute weiß, wird die Blut-Hirn-Schranke bei Alzheimerpatienten allerdings durchlässig. Verschiedene Teams weltweit arbeiten darum an blutbasierten Testverfahren.

2018 hatten Forscher aus Japan und Australien eine Methode vorgestellt, mit der sich Beta-Amyloid-Biomarker im Blut von Patienten identifizieren ließen. Die Markerwerte korrelierten sehr gut mit der Menge der Amyoid-Ablagerungen, welche per PET sichtbar gemacht wurden.

Der Bochumer Test geht allerdings darüber hinaus, denn Gerwert und sein Team können damit die Erkrankung wirklich vorhersagen.

Ihr Verfahren arbeitet unter anderem mit Spektroskopie. Ein mit Antikörpern beschichteter Sensor fischt selektiv Beta-Amyloid aus Blutproben. Ob sich solche Moleküle tatsächlich an den Sensor gebunden haben, registriert anschließend ein Infrarot-Spektrometer. 2016 haben Gerwert und seine Mitarbeiter belegt, dass dieses Verfahren zuverlässig entsprechende Moleküle in Blutproben von mild bis schwer erkrankten Patienten erkennt. Im nächsten Schritt befassten sie sich mit 970 Probanden, die zu Studienzwecken seit vielen Jahren unter Beobachtung stehen. Um das Jahr 2000 – damals zeigten die Teilnehmer keine Alzheimersymptome – waren deren Blutproben eingelagert worden. Bei 195 von ihnen entwickelte sich später eine Alzheimererkrankung, und zwar im Mittel acht Jahre nach der Probenentnahme. Die heutige Analyse ihrer damals eingefrorenen Blutproben lieferte für die meisten den korrekten Befund einer beginnenden Demenz.

Sensitivität und Spezifizität

Zunächst hatte das Diagnoseverfahren allerdings nur eine Sensitivität von 75 Prozent und eine Spezifizität von 87 Prozent. Es erkannte also 75 Prozent der Erkrankten korrekt als krank und 87 Prozent der nicht Erkrankten korrekt als gesund. Damit lieferte es zu viele falsch positive Ergebnisse, klassifizierte mithin zu viele gesunde Personen fälschlicherweise als krank. Deshalb entwickelten Gerwert und seine Kollegen das Verfahren weiter. Sie schlossen in die Untersuchung als zweiten Biomarker das Tau-Protein ein, um ein weiteres Kriterium zum Unterscheiden zwischen Gesunden und Kranken zu bekommen. »Mit Hilfe dieses zweiten Markers erreichen wir jetzt eine Spezifizität von 97 Prozent«, berichtet der Biophysiker.

Der Test prüft nun im ersten Schritt mittels Blutprobe auf Beta-Amyloid. Die dabei identifizierten möglicherweise Erkrankten durchlaufen zusätzlich eine zweite Phase, in der Mediziner die Rückenmarksflüssigkeit auf Tau-Proteine hin untersuchen. »Momentan arbeiten wir fieberhaft daran, das Tau ebenfalls in Blutproben nachzuweisen, damit wir dafür keinen Liquor entnehmen müssen«, sagt Gerwert. Er ist optimistisch, dass seinem Team dies im Lauf des kommenden Jahres gelingt. »Dann hätten wir einen rein blutbasierten Test.«

Die Wissenschaftler haben das zweistufige Verfahren bereits erfolgreich an Patienten erprobt, die erste Symptome der Alzheimererkrankung zeigten. In einer weiteren Studie

möchten sie prüfen, ob es Betroffene auch schon lange vor dem Ausbruch klinischer Symptome erkennt. Dabei stehen sie jedoch vor einem Dilemma, wie Gerwert darlegt: »Wenn jemand wissen möchte, ob er Alzheimer bekommen wird oder nicht, können wir aus ethischen Gründen diesen Test nicht einsetzen, da es keine wirksame Therapie gibt.« Doch rein zu Forschungszwecken könne die Methode sehr hilfreich sein, indem sie etwa erlaube, die langfristige Vorsorgewirkung bestimmter Wirkstoffkandidaten zu prüfen. Die Bochumer Forscher sind dafür bereits Kooperationen mit Pharmafirmen eingegangen.

Das Risiko mindern

Solange keine wirksamen Arzneistoffe zur Alzheimertherapie gefunden sind, hat die Prävention der Erkrankung einen hohen Stellenwert. »Eine Demenz lässt sich vermeiden oder hinauszögern, indem man die so genannten Gefäßrisikofaktoren regelmäßig kontrolliert und bei Bedarf entsprechend einstellt«, berichtet Kukolja. »Dazu zählen in erster Linie der Blutdruck, aber auch der Blutzucker und die Blutfette.« Inzwischen gebe es klare Belege dafür, dass solche Gefäßrisikofaktoren mit einer erhöhten Demenzgefahr einhergehen. Auch guter Schlaf sei für die Krankheitsvorsorge enorm wichtig, ebenso gute Ernährung, Sport und geistige Regsamkeit – etwa das Erlernen von Fremdsprachen – bis ins hohe Alter. ◀

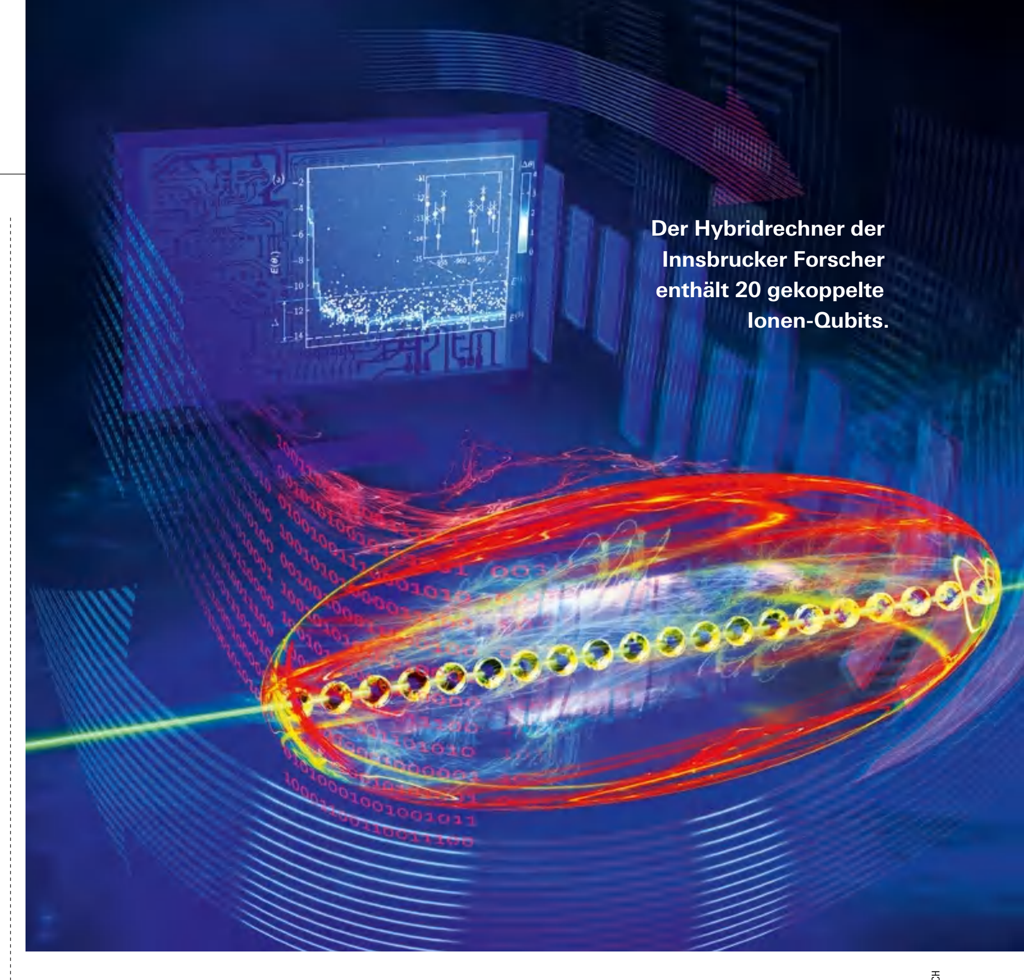
Lukas B. Kohlenbach ist Wissenschaftsjournalist in Köln.

QUELLEN

Nabers A. et al.: Aß and tau structure-based biomarkers for a blood- and CSF-based two-step recruitment strategy to identify patients with dementia due to Alzheimer's disease. Alzheimer's & Dementia 11, 2019

Nakamura, A. et al.: High performance plasma amyloid-ß-biomarkers for Alzheimer's disease. Nature 554, 2018

Rowe, C.C. et al.: Predicting Alzheimer disease with ß-amyloid imaging: results from the Australian imaging, biomarkers, and lifestyle study of ageing. Annals of Neurology 74, 2013



Der Hybridrechner der Innsbrucker Forscher enthält 20 gekoppelte Ionen-Qubits.

QUANTENPHYSIK

HYBRIDCOMPUTER RECHNET SCHNELLER

Auf sich allein gestellt sind die Möglichkeiten von Quantensimulatoren noch begrenzt. Im Tandem mit klassischen Rechnern könnten aus ihnen bald jedoch sehr nützliche Werkzeuge werden.

Wenn Physiker sagen, Quantencomputer seien herkömmlichen Rechnern bald überlegen, meinen sie eine spezialisierte Maschine, die nur eine bestimmte Aufgabe schneller löst als jeder Supercomputer. Den für jedwede Anwendung frei programmierbaren Digitalcomputer werden solche frühen Modelle nicht ersetzen. Ein universeller Quantencomputer sei noch mindestens ein Jahrzehnt entfernt, prophezeien Experten.

Im Team könnten einfache Quantenrechner und klassische Computer jedoch schon früher nützliche Ergebnisse liefern. Kombiniert man sie geschickt, entsteht ein so genannter Hybridrechner. Seine Stärke besteht darin, nur den besonders kniffligen Teil eines Problems an einen »Quanten-Koprozessor« auszulagern, viele andere Arbeitsschritte aber von einem klassischen Computer ausführen zu lassen. Forscher der Universität Innsbruck konnten nun demonstrieren, dass das Konzept viel versprechend ist – und bei ausgewählten Aufgaben vielleicht bald herkömmliche Supercomputer herausfordern könnte.

Der Trumpf von Quantencomputern: Sie nutzen die bizarren Gesetze der Quantenphysik zu ihrem Vorteil. Während ein klassischer Rechner in einem Bit jeweils nur einen der beiden möglichen Werte 0 oder 1 speichert, hält ein Quantenobjekt wie ein Atom oder Elektron hingegen zwei Zustände simultan – zumindest solange keine

Messung stattfindet. Bei bestimmten Rechenaufgaben könnte ein Computer aus gekoppelten »Quantenbits« dadurch viele Überlagerungszustände parallel verarbeiten. Er löst diese Probleme dadurch prinzipiell schneller als ein klassischer Rechner, der jede Zustandskombination einzeln durchtesten muss.

Analoge Quantencomputer als Zwischenschritt

Eine Voraussetzung für die Überlegenheit von Quantencomputern ist, dass die Qubits miteinander verbunden oder »verschränkt« sind. Bei einem frei programmierbaren Quantenrechner werden Schritt für Schritt je zwei oder drei Qubits miteinander verschränkt. Man spricht dann von einem digitalen Quantencomputer, denn er zerlegt ähnlich wie ein herkömmlicher Digitalcomputer alle Aufgaben in wenige Arten von logischen Einzelschritten.

Damit ein Quantenrechner ein komplexes Programm ausführen kann, müsste er tausende Qubits verknüpfen. Das gelingt bislang aber nicht. Qubits büßen durch kleinste Umwelteinflüsse, etwa den Zusammenstoß mit einem Luftmolekül, binnen Sekundenbruchteilen ihre Doppelexistenz ein. Das begrenzt die möglichen Rechenschritte. Zwar halten Forscher Qubits immer länger stabil. Doch bis zu einem Quantenrechner, der klassische Pendants bei sinnvollen Aufgaben überflügeln kann, ist der Weg noch weit.

Schneller ans Ziel könnten analoge Quantencomputer kommen, Physiker nennen sie auch Quantensimulatoren. Forscher stellen mit ihnen ein konkretes Problem aus der Quantenphysik nach, etwa die Wechselwirkung zwischen den Bausteinen eines Moleküls oder die Dynamik von Elektronen in einem Kristall (siehe **Spektrum** Januar 2018, S. 28). Eine geschickte Programmierung vorausgesetzt, verhalten sich Qubit-Ensembles analog zu diesen Originalen, schließlich wirken zwischen den quantenphysikalischen Recheneinheiten ebenfalls die skurrilen Gesetze des Mikrokosmos. Quantensimulatoren eignen sich daher bestens dafür, komplexe Systeme besser zu verstehen und aussagekräftige Modelle zu entwickeln.

Klassische Rechner tun sich dagegen sehr schwer damit, Quantensysteme nachzustellen. Die Komplexität einer Simulation wächst auf diesen exponentiell mit der Zahl der beteiligten Teilchen. Bei Quantencomputern gilt das nicht, hier wächst der Aufwand lediglich linear. Allerdings ist ein analoger Quantenrechner unflexibel – er kann einzig die Lösung für die Aufgabe ausspucken, für die er gebaut wurde.

Hier setzt die Arbeit der Forscher um Christian Kokail von der Universität

Innsbruck an: Ihr Hybrid enthält einen Quantensimulator, kann diesen aber viel flexibler einsetzen. Dazu kooperiert die Maschine mit einem gewöhnlichen Computer, der gewissermaßen die Programmierung des Quantensimulators übernimmt. Die meisten Arbeitsschritte führen somit konventionelle Bits und Bytes durch. Nur wenn es um Rechnungen geht, bei denen die Quantenphysik eine Rolle spielt, lagert der Hybrid diese an den Quanten-Koprozessor aus.

Die Innsbrucker Forscher verwendeten hierfür einen Quantensimulator mit 20 Kalziumionen, die von einem elektromagnetischen Feld in einer Kette gehalten werden. Mit Lasern lassen sich die Qubits einerseits einzeln ansteuern und andererseits untereinander verknüpfen. Diese beiden Operationen dienen bildlich gesprochen als Bausteine, mit denen sich komplexere Rechnungen durchführen lassen. Je nachdem, wie man sie kombiniert, bilden sie eine andere physikalische Situation nach.

In der Studie ging es um so genannte Gittermodelle. Festkörper- oder Teilchenphysiker untersuchen mit ihnen Phänomene wie Magnetismus oder die Erzeugung von Teilchenpaaren. Die Innsbrucker Forscher versuchten sich an einem Prozess aus der Teilchenphysik: die spontane Entstehung und Vernichtung von Elementarteilchen-Paaren im Vakuum, genauer von Elektronen und deren Antiteilchen, so genannten Positronen.

Wie ein Mischpult mit 1000 Schiebereglern

Der Ablauf lässt sich mit den Qubits des Quantensimulators nachstellen. Der Wert 0 bedeutet Vakuum (kein Teilchen). Der Wert 1 steht für ein Elektron oder Positron, je nachdem, ob das entsprechende Qubit auf einem geraden oder ungeraden Platz in der Kette aus Kalziumionen sitzt. So ergibt sich ein komplexes System, das über 1000 Konfigurationen einnehmen kann.

Im Quantenrechner können zur selben Zeit Überlagerungen aller möglichen Zustände existieren, in allen denkbaren Mischungsverhältnissen. Eine wichtige Frage von Physikern an solch ein System ist, welche Konfiguration die geringste Energie hat, also wie der »Grundzustand« des Systems aussieht.

Der Quantensimulator gibt die Energie eines Mischzustands sofort aus, wenn ein Experimentator diese misst. Aber wie lässt sich sagen, ob es sich dabei um den Grundzustand handelt? Das ist eine Stärke von klassischen Rechnern, genauer von so genannten Optimierungsalgorithmen. Sie finden, bildlich gesprochen, schnell das tiefste Tal in einer zerklüfteten, weitläufigen Gebirgslandschaft. Die Innsbrucker Forscher haben die beiden Rechner deshalb zu einer Feedbackschleife verbunden.

Der Quantenrechner startet mit einem beliebigen Testzustand. Dessen Energie wird gemessen und an den klassischen Rechner gemeldet. Eine darauf installierte Software verändert zunächst willkürlich den Zustand, indem sie die Laser zur Kontrolle der Ionen ansteuert. Der Zyklus wiederholt sich mit dem neuen Zustand. Auf diese Weise erkundet der Optimierungsalgorithmus die Gebirgslandschaft aus den ermittelten gemessenen Energien. Er erkennt, wie er schnell und doch ziemlich sicher das tiefste Tal findet. Im Experiment der Innsbrucker prüfte der Algorithmus so binnen kurzer Zeit bis zu 200 000 verschiedene Einstellungen.

»Wir verwenden damit die besten Eigenschaften beider Technologien«, sagt Teammitglied Christine Maier. Damit hole man mehr aus den derzeit verfügbaren Quantenressourcen heraus. Schon zuvor hatte ein Team von Physikern aus Innsbruck und Garching Teilchenpaar-Prozesse mit einem Quantensimulator aus vier Qubits untersucht. Auch haben Forscher bereits sechs Qubits mit klassischen Rechnern kombiniert.

Nun haben die Österreicher die Zahl mehr als verdreifacht – und so den Boden für noch größere Hybride bereitet. Jürgen Berges von der Universität Heidelberg, der nicht an der Arbeit beteiligt war, bewertet diese Skalierbarkeit als wichtigen Fortschritt. »Bislang war der klassische Rechner der Flaschenhals«, sagt er. Denn das Optimierungsprogramm müsste bei zusätzlichen Qubits unverhältnismäßig viel mehr Schritte ausführen. Das verhinderte bislang den Ausbau auf viele Qubits.

Die Innsbrucker Forscher umgingen diese Schwierigkeit, indem sie Symmetrien der simulierten Gittermodelle ausnutzten. Diese vermindern die Zahl der Möglichkeiten, die der digitale Computer durchtesten muss. Das ist ähnlich wie bei einem Quadrat. Man muss nur die Länge einer Seite messen, um die der anderen drei zu kennen. Eine der Symmetrien des Innsbrucker Modells: Die Entstehung eines Elektrons an einem Platz ist mit der eines Positrons an einem anderen gekoppelt. »Die Nutzung der Symmetrien reduziert den Aufwand für den klassischen Computer drastisch«, sagt Studienautor Christian Kokail.

Derzeit arbeiten die Physiker an einem Hybridcomputer mit 50 Qubits. Etwas oberhalb davon liegt nach Einschätzung von Experten die Schwelle, an der Quantensimulatoren möglicherweise ihre Überlegenheit bei einer größeren Klasse ausgewählter Aufgaben demonstrieren werden. Denn herkömmliche Superrechner können Systeme aus etwa 50 Atomen gerade noch simulieren.

Hybridcomputer könnten die Lücke zwischen digitalen und analogen Quantenmaschinen überbrücken oder sogar schließen, meint auch Jürgen Berges. Statt eines Quantencomputers, der von sich aus alle Rechnungen ausführen kann, hätte man dann einen halbwegs flexiblen Quantensimulator, der von einem klugen klassischen Computer stets die richtige Frage gestellt bekommt. ◂

Christian J. Meier ist promovierter Physiker und Wissenschaftsjournalist in Groß-Umstadt.

QUELLEN

Kokail, C. et al.: Self-verifying variational quantum simulation of lattice models. Nature 10.1038/s41586-019-1177-4, 2019

Martinez, E.A. et al.: Real-time dynamics of lattice gauge theories with a few-qubit quantum computer. Nature 10.1038/nature18318, 2019



SPRINGERS EINWÜRFE
DIE GUTE ALTE ZUKUNFT

Wie genau sahen frühere Prognosen die Gegenwart voraus? Eine Vorhersage von einst kann für heutige Zukunftsentwürfe lehrreich sein.

Michael Springer ist Schriftsteller und Wissenschaftspublizist. Eine neue Sammlung seiner Einwürfe ist 2019 als Buch unter dem Titel »Lauter Überraschungen. Was die Wissenschaft weitertreibt« erschienen.

spektrum.de/artikel/1675644

Irgendein Witzbold – gehandelt werden unter anderem Mark Twain und Karl Valentin – hat den weisen Satz geprägt: »Prognosen sind schwierig, besonders wenn sie die Zukunft betreffen.« Sir Karl Popper drückte dasselbe seriöser aus: Die Zukunft wird zuvörderst von technischem Wandel geprägt – aber das Wesen künftiger Entdeckungen besteht nun einmal darin, heute nicht bekannt zu sein.

Wen wundert's also, dass sich Propheten umso eher blamieren, je präziser sie sich ausdrücken. Zukunftsforscher Robert Jungk prognostizierte 1952 die industrielle Beherrschung der Kernfusion für spätestens 1970, doch die Menschheit wartet schon ein halbes Jahrhundert länger auf die energetische schwarze Null bei Tokamak und Stellarator. Und ob bald Scharen von in Deutschland fabrizierten Flugtaxis durch Bayerns Lüfte schwirren werden, wie Digitalisierungs-Staatsministerin Dorothee Bär kühn verspricht, darf man mit gesunder Skepsis abwarten.

So griff ich ohne große Erwartung nach einem knapp 40 Jahre alten Bestseller, um nachzusehen, wie sich Prognosen von damals bewährt haben. In »The Third Wave« (auf Deutsch 1980 als »Die Zukunftschance« erschienen) unterschied der US-Futurologe Alvin Toffler drei Innovationsschübe. Die erste Welle begann mit der neolithischen Revolution, also dem Übergang vom Nomadentum zur Züchtung von Nutztieren und Ackerpflanzen; die zweite bildete die Industrialisierung. Gegenwärtig, so Toffler, stehen wir am Anfang einer dritten Welle, die von digitaler Informationsverarbeitung geprägt ist.

So weit, so gut, weil allgemein. Doch zu meinem Erstaunen bestehen auch manche Einzelprognosen den Gegenwartstest. Dem Visionär kam wohl zugute, dass er in seinen linken Anfängen praktische Fabrikerfahrung am Fließband gesammelt hatte, während er später libertäre, staatsferne Ansichten vertrat. Die resultierende systemneutrale Haltung erklärt die große Wirkung, die Tofflers Schriften in China im Lauf der Liberalisierung unter Deng Xiaoping ausübten.

Einige Technologien, die Toffler für Komponenten der dritten Welle hielt, sind zwar Utopien geblieben – etwa die Bewirtschaftung des Weltraums oder der Tiefsee –, doch erkannte der seinerzeit manchmal als »grüner Techno-Rebell« belächelte Prophet, dass die Menschheit sich letztlich von der Kernenergie ab- und der Solartechnik zuwenden würde.

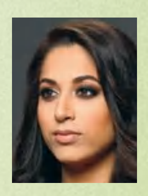
Genau sah Toffler die Individualisierung der Massenmedien und der Informationstechnik voraus: neben landesweit sendenden Fernsehanstalten ein Fleckenteppich spartenweise differenzierter Kabelprogramme; nicht mehr nur große IBM-Zentralrechner, sondern private Heimcomputer für jedermann.

Was der Visionär bloß ansatzweise ahnte, war der entscheidende nächste Schritt, die elektronische Vernetzung. Aus den passiven Empfängern der alten Medien macht sie aktive Sender, die im weltweiten Netz Texte, Bilder, selbst gemachte Filme und Musikstücke tauschen. Als habitueller Optimist erblickte der 2016 verstorbene Toffler in alldem glorreiche Möglichkeiten für eine restlos individualisierte Gesellschaft von glücklichen Heimarbeitern.

Was sagt uns das? Prognosen können durchaus Treffer landen, versagen aber vor den sozialen Veränderungen, die mit »disruptiven« Technologien einhergehen. Was werden immer potentere Genmanipulationstechniken aus uns machen? Wie wird unser künftiges Zusammenleben mit intelligenten Maschinen aussehen? Und was wird das Internet mit uns anstellen? Vereint es uns zum globalen Dorf, oder spaltet es uns in lauter Hassblasen? Unsere Gegenwart kommt mir viel unberechenbarer vor als Tofflers gute alte Zukunft – und von heute 40 Jahre nach vorn zu schauen, erscheint mir als glatte Unmöglichkeit.

IMPFUNGEN
DAS DENGUE-DEBAKEL

Ein Impfstoff gegen Denguefieber könnte für Menschen gefährlich sein, die vor der Impfung noch nie Kontakt mit dem Erreger hatten. Grund ist vermutlich eine nicht kontrollierbare Immunreaktion.




Seema Yasmin (links) ist Journalistin, Autorin und Ärztin. Sie unterrichtet Wissenschaftsjournalismus an der Stanford University. **Madhusree Mukerjee** leitet den Bereich Wissenschaft und Gesellschaft bei der Zeitschrift »Scientific American«.

spektrum.de/artikel/1675646

Im Dezember 2015 wurde Dengvaxia, der weltweit erste Impfstoff gegen Denguefieber, in Mexiko zugelassen. Knapp einen Monat später folgten die Philippinen und Brasilien, und die damalige philippinische Regierung vereinbarte mit dem französischen Pharmaunternehmen Sanofi die Lieferung von drei Millionen Ampullen des Vakzins. Der neu entwickelte Wirkstoff sollte eine Million Kinder ab neun Jahren vor den schlimmsten Folgen der Infektionskrankheit schützen – so der Plan.

Über 390 Millionen Menschen stecken sich einer Expertenstudie zufolge jedes Jahr mit dem Denguevirus an. Es tritt in vier unterschiedlichen Subtypen auf, die von weiblichen Stechmücken der Gattung *Aedes*, vor allem der Art *Aedes aegypti* (Gelbfiebermücke), übertragen werden. Aber nicht alle, die sich mit dem Erreger infizieren, erkranken. Von vier Personen, die durch einen Mückenstich mit ihm in Kontakt kommen, zeigen drei normalerweise keinerlei Symptome. Bei den anderen manifestiert sich die Infektion in einem von drei Krankheitsbildern: Die einen bekommen Fieber, das auch bei vielen anderen Viruserkrankungen auftritt; andere leiden unter dem »typischen« Denguefieber, das von Kopf-, Gelenk- und Knochenschmerzen, einem Druckschmerz hinter dem Auge und mitunter von inneren Blutungen begleitet wird. Bei wieder anderen jedoch entwickelt sich eine lebensbedrohliche Erkrankung, gekennzeichnet durch so genanntes hämorrhagisches Denguefieber und Dengue-Schocksyndrom. In besonders schweren Fällen kann dabei Plasma aus den Blutkapillaren heraussickern, wodurch sich Flüssigkeit in der Umgebung der Organe ansammelt. Es folgen massive innere Blutungen, die schließlich zum Versagen von Gehirn, Nieren und Leber führen. Werden die Betroffenen umgehend in ein Krankenhaus eingewiesen und dort intensivmedizinisch betreut,

Die Gelbfiebermücke *Aedes aegypti* überträgt einige gefährliche Viren, darunter auch vier, die Denguefieber hervorrufen. Während die Erstinfektion mit einem Denguevirus für gewöhnlich harmlos verläuft, kann eine erneute Infektion tödlich enden – eine Eigentümlichkeit, die den ersten zugelassenen Impfstoff gegen Denguefieber vor Probleme stellt.

FRANK600 / GETTY IMAGES / ISTOCK



AUF EINEN BLICK
FATALE DENGUE-IMPFUNG?

1 Jedes Jahr infizieren sich rund 390 Millionen Menschen mit dem Denguevirus. Während die erste Infektion oft unbemerkt bleibt, kann die zweite zum Tod führen.

2 Die Theorie der infektionsverstärkenden Antikörper (kurz ADE) erklärt, warum die zweite Dengueinfektion im Gegensatz zur ersten tödlich verlaufen kann. Neuere Untersuchungen stützen das Modell.

3 Der weltweit erste zugelassene Dengueimpfstoff imitiert offenbar eine Erstinfektion und verschlimmert so womöglich eine zweite. Ob ADE die treibende Kraft dahinter ist, wird aktuell kontrovers diskutiert.

kann das ihr Leben retten. Trotzdem sterben jährlich weltweit mehr als 20000 Menschen an Denguefieber, unter ihnen zahlreiche Kinder.

Die Krankheit tritt heute 30-mal so oft auf wie noch vor 50 Jahren. Bereits seit Jahrzehnten warten Mediziner in Entwicklungsländern daher sehnlichst auf einen Impfstoff. Trotzdem waren Antonio und Leonila Dans, beide klinische Epidemiologen am College of Medicine der University of the Philippines in Manila, irritiert angesichts der gewaltigen Summen, die die nationale Impfkampagne verschlingen sollte. Mit einem Preis von drei Milliarden philippinischen Pesos (etwa 50 Millionen Euro) allein für die Beschaffung des Vakzins sollte sie mehr kosten als das gesamte staatliche Impfprogramm des Jahres 2015, das Immunisierungen gegen Lungenentzündung, Tuberkulose, Poliomyelitis, Diphtherie, Tetanus, Keuchhusten, Masern, Mumps und Röteln umfasste. Darüber hinaus würde die Denguefieber-Schutzimpfung nicht einmal ein Prozent der etwa 105 Millionen Einwohnerinnen und Einwohner des Landes erreichen. Und mit etwa 750 Todesopfern pro Jahr zählt die Erkrankung nicht zu den zehn landesweit häufigsten Todesursachen; Lungenentzündung und Tuberkulose fordern einen weitaus höheren Tribut.

Weiteren Anlass zur Besorgnis gab den beiden Medizinern der Zwischenbericht der klinischen Studien, die Wissenschaftler von Sanofi Pasteur, der Impfstoffsparte von Sanofi, im Zusammenhang mit Dengvaxia durchgeführt hatten. Denn bei gegen Denguefieber geimpften, zwei- bis fünfjährigen asiatischen Kindern war die Wahrscheinlichkeit, im dritten Jahr nach der Impfung wegen schwerer Denguesymptome im Krankenhaus behandelt zu werden, nicht etwa niedriger als bei nicht geimpften Kindern derselben Altersgruppe – sondern siebenmal höher. Eine gründliche Überprüfung der Daten enthüllte zwar, dass das Vakzin für ältere Mädchen und Jungen im Durchschnitt weniger gefährlich war. Dennoch konnte man statistisch die Möglichkeit nicht ausschließen, dass Dengvaxia den Krankheitsverlauf bei einigen Kindern erheblich verschlimmerte.

Frühe Warnsignale

Im März 2016 verfassten die Dans zusammen mit anderen Fachkollegen daher einen Brief an die damalige Gesundheitsministerin Janette Garin, in dem sie warnten, Dengvaxia könne für manche Kinder ein Gesundheitsrisiko darstellen. Zudem gebe es auf den Philippinen nicht genügend ausgebildetes medizinisches Fachpersonal, um derart viele Kinder hinsichtlich eventueller gesundheitlicher Beeinträchtigungen zu überwachen. Sie empfahlen, einen zweiten, aller Voraussicht nach ungefährlicheren Impfstoff abzuwarten, der sich gerade in der Entwicklung befand.

Die hoch angesehene Impfstoff-Beratergruppe der Weltgesundheitsorganisation (WHO), welche die Länder in Bezug auf Impfpolitik und Vakzinierungsstrategien berät, erklärte allerdings noch im selben Monat in einem Informationspapier zu Dengvaxia, die Anzahl der stationären Behandlungen von jüngeren geimpften Kindern sei statistisch nicht signifikant, wenn man sie über mehrere Jahre betrachte. »In keiner Altersgruppe der über fünfjährigen Kinder wurden weitere Sicherheitsrisiken festgestellt«, hieß es in der WHO-Stellungnahme. Zwar existiere eine »theoretische Möglichkeit«, dass das Vakzin für einige Kinder ein Risiko berge, und es bestehe weiterer Forschungsbedarf, um zu vermeiden, dass das öffentliche Vertrauen in den Impfstoff untergraben werde. Gleichwohl sollte die Dengueimpfung im Rahmen des regulären Impfprogramms in entsprechenden Gegenden eingeführt werden. Dazu zählen Regionen, in denen mindestens 70 Prozent der Einwohnerinnen und Einwohner bereits eine Dengueinfektion durchgemacht haben und eine Impfung im frühen Jugendalter die Anzahl der stationären Behandlungen innerhalb von 30 Jahren um bis zu 30 Prozent verringern könnte. In einem anschließend erschienenen Positionspapier gab die Expertengruppe bekannt, dass der Impfstoff für Kinder ab neun Jahren sicher sei und daher für diese empfohlen werde.

Rückblickend überrascht es Antonio und Leonila Dans nicht sonderlich, dass die Behördenvertreter ihre Bedenken ignorierten. »Sie mussten sich entscheiden, ob sie uns oder der WHO glauben sollten«, stellt Antonio Dans fest. Die philippinischen Behörden waren offenbar derart von der Unbedenklichkeit des Vakzins überzeugt, dass sie Dengvaxia von den Untersuchungen zur Pharmakovigilanz befreiten, in denen die Sicherheit eines neuartigen Arzneimittels

Einem Kind in Managua, Nicaragua, wird im Rahmen einer umfangreichen Denguefieber-Studie eine Blutprobe entnommen.

SUSTAINABLE SCIENCES INSTITUTE, PAOLO HARRIS PAZ



oder Impfstoffs gewöhnlich mehrere Jahre lang unter lokalen Gegebenheiten getestet wird. Normalerweise dauere es ab der Marktzulassung drei bis fünf Jahre, bis ein neues pharmazeutisches Produkt in das staatliche Impfprogramm aufgenommen werde, erläutert Anthony Leachon, früherer Vorsitzender des Philippine College of Physicians, in dem sich philippinische Internisten zusammengeschlossen haben. Das Dengue-Impfprogramm begann dagegen quasi sofort nach der Zulassung – im April 2016.

Der Verdacht: Eine umstrittene Hypothese

Wenige Tage nach dem Start gab es bereits Berichte über ein erstes Todesopfer. Ein Junge mit einem angeborenen Herzfehler war nach der Impfung gestorben. In einer Presseinformation versicherte Janette Garin sogleich, der Tod des Kindes stehe in keinerlei Zusammenhang mit Dengvaxia. Die Dans gingen der Angelegenheit jedoch mehrere Monate lang nach, sprachen mit Journalisten und veröffentlichten ein kurzes Video auf Facebook. In diesem warnten sie auf der Grundlage der jahrzehntealten, allerdings höchst umstrittenen Theorie des so genannten »antibody-dependent enhancement« (ADE, deutsch: infektionsverstärkende Antikörper) davor, dass Dengvaxia für ein Kind, das noch nie zuvor an Denguefieber erkrankt war, möglicherweise gefährlich sei. Bei diesen Patienten könnte eine anschließende tatsächliche Dengueinfektion auf Grund der Impfung weitaus schwerer verlaufen als im Normalfall, vielleicht sogar tödlich. Garin antwortete darauf mit der Warnung,

SUSTAINABLE SCIENCES INSTITUTE; PAOLO HARRIS PAZ



dass Ärzte, die »Fehlinformationen« im Zusammenhang mit Dengvaxia verbreiteten, die Verantwortung für jeden Denguefieber-Todesfall übernehmen müssten, der durch den Impfstoff hätte verhindert werden können.

Von da an ruhte die Angelegenheit bis zum November 2017, als Sanofi Pasteur plötzlich verlauten ließ: Personen, die noch nie mit dem Denguevirus infiziert worden waren, sollten Dengvaxia nicht erhalten. Und einen Monat später erließ die WHO neue Leitlinien, die den Impfstoff nur für Menschen mit einer »früheren nachweislich durchgemachten Dengueinfektion« empfahlen. Im Dezember 2017 stoppten die philippinischen Behörden daraufhin das Dengue-Impfprogramm, was eine Welle der Empörung nach sich zog. Mehr als 830000 Schulkinder waren gegen Denguefieber geimpft worden, 154 von ihnen waren laut Mitteilung des Gesundheitsministeriums als Folge diverser Krankheiten gestorben (Stand September 2018). Die überwiegende Zahl der Todesfälle stand zwar in keinem Zusammenhang mit dem Impfstoff, doch bestätigten klinische Beobachtungen und Blutuntersuchungen, dass immerhin 19 von ihnen auf eine Dengueinfektion zurückzuführen waren.

Bei Sanofi Pasteur ist man der Ansicht, die Todesopfer auf den Philippinen rührten eventuell von einem Versagen des Impfstoffs her, der einer kleinen Gruppe von geimpften Kindern keinen ausreichenden Schutz verliehen habe. Einige Fachleute, unter ihnen Antonio und Leonila Dans, argumentieren dagegen, dass Dengvaxia einen ersten Kontakt mit dem Denguevirus imitiert, der den Körper darauf programmieren kann, in lebensgefährlicher Weise auf eine zweite Dengueinfektion zu reagieren.

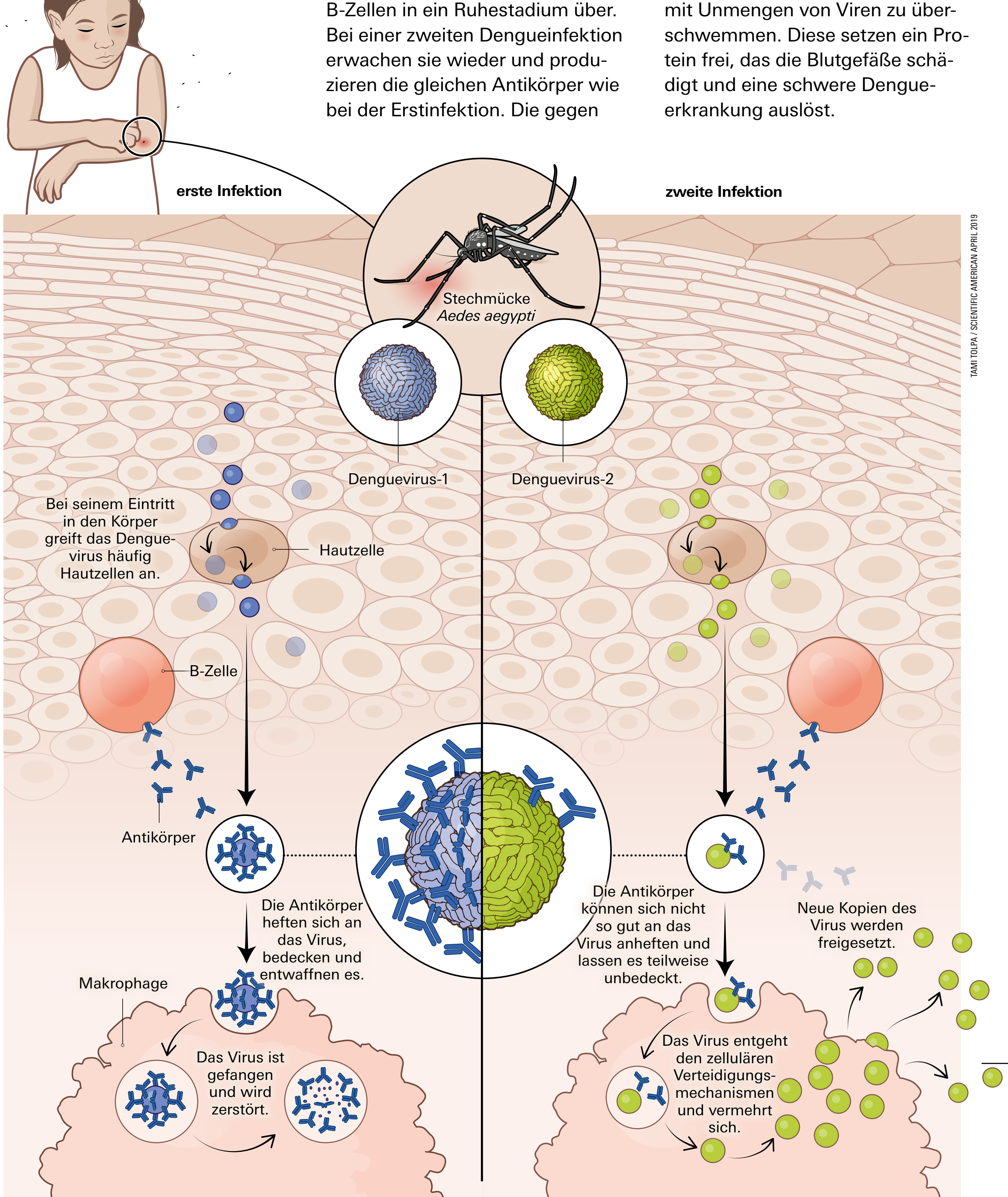
Bei den meisten Viren verläuft eine zweite Infektion grundsätzlich sehr viel harmloser als die vorherige oder findet gar nicht erst statt, weil ein einmaliger Kontakt lebenslange Immunität verleiht, wie beispielsweise beim Erreger der Masern. Im Fall von Denguefieber hingegen endet ein weiterer Kontakt mit dem Virus mit höherer Wahrscheinlichkeit tödlich. Wissenschaftler und Ärzte haben viele Jahre lang zu enträtseln versucht, warum das so ist. In den 1950er und 1960er Jahren, als einige Regionen in Asien immer häufiger von schweren Dengueepidemien heimgesucht wurden, fragten sie sich sogar, ob sie es mit einer völlig neuen Erkrankung zu tun hatten. Das ihnen bekannte Denguefieber schwächte und ermattete die Menschen; die neue Ausprägungsform verlief dagegen weitaus schlimmer oder war sogar tödlich. Hatte das Virus mutiert? Oder war vielleicht das Immunsystem für die schweren Krankheitsverläufe verantwortlich?

Ein junger Wissenschaftler, der gerade sein Examen an der medizinischen Hochschule abgeschlossen hatte, wollte auf diese Fragen eine Antwort finden. 1957 begann Scott B. Halstead während seiner Tätigkeit für die US-Armee in Japan Viren zu erforschen, die von Stechmücken auf den Menschen übertragen werden. Vier Jahre später wurde er erstmals selbst Zeuge eines Ausbruchs von Denguefieber in einer städtischen Kinderklinik in Bangkok. Die Krankenhausärzte hegten damals die Vermutung, dass die eingelieferten Jugendlichen, von denen nahezu ein Viertel starb, an einer Vergiftung litten. Eine Gruppe von Ärzten und Wissenschaftlern unter Halsteads Leitung identifizierte schließlich

Wie Antikörper das Denguefieber verschlimmern können

Vier miteinander verwandte Viren, die von Stechmücken der Gattung *Aedes* übertragen werden, rufen Denguefieber hervor. Die von Scott B. Halstead in den 1970er Jahren formulierte Theorie der infektionsverstärkenden Antikörper (antibody-dependent enhancement, kurz ADE) versucht zu erklären, warum eine zweite Infektion mit einem anderen Denguevirus sehr viel schlimmer als die erste und manchmal sogar tödlich verlaufen kann.

Bei einem ersten Kontakt, beispielsweise mit Denguevirus-1, bilden B-Zellen des Immunsystems Antikörper. Diese heften sich an die Oberfläche der Viren und transportieren sie zu Makrophagen, welche die Erreger aufnehmen und zerstören. Anschließend gehen die B-Zellen in ein Ruhestadium über. Bei einer zweiten Dengueinfektion erwachen sie wieder und produzieren die gleichen Antikörper wie bei der Erstinfektion. Die gegen Denguevirus-1 gerichteten Antikörper können allerdings nicht so gut an beispielsweise Denguevirus-2 binden. Sie transportieren die Eindringlinge zwar nach wie vor zu den Makrophagen, doch den Viren gelingt es, ihrer Zerstörung zu entgehen und stattdessen die Kontrolle über die Makrophagen zu gewinnen. Sie nutzen deren zelluläre Maschinerie, um sich zu vervielfältigen und den Körper anschließend mit Unmengen von Viren zu überschwemmen. Diese setzen ein Protein frei, das die Blutgefäße schädigt und eine schwere Dengueerkrankung auslöst.



das Denguevirus als Verursacher der Epidemie. Bei seinen nachfolgenden Untersuchungen stieß er auf ein noch weitaus überraschenderes Phänomen: Kinder, die sich ein zweites Mal mit dem Denguevirus infizierten – und zwar mit einem anderen Subtyp als bei der Erstinfektion –, sowie Babys, deren Mütter eine Immunität gegen Dengue aufwiesen, besaßen das größte Risiko, an schwerem, möglicherweise tödlichem Denguefieber zu erkranken. Doch niemand konnte erklären, was die Ursache für diesen Befund war.

1964 infizierte dann der Virologe Royle A. Hawkes, der damals an der Australian National University in Canberra forschte, Zellkulturen mit den Erregern der Murray-Valley-Enzephalitis, des West-Nil-Fiebers, der Japanischen Enzephalitis oder mit dem Getah-Virus. Dabei beobachtete er, dass die Viren eine größere Zahl von Zellen befielen, wenn sie zusammen mit Antikörpern verabreicht wurden. Hawkes folgerte daraus, dass die Antikörper die Viren stabilisierten und deren Bindungsfähigkeit an Zellen erhöhten. Unabhängig davon fragte sich Halstead, ob beim Denguevirus etwas Ähnliches geschah.

Unerwartete Unterstützung

Um zu verstehen, warum ein doppelter Kontakt mit verschiedenen Dengueviren nötig ist, damit die zweite Infektion tödlich endet, verabreichte Halstead 188 Affen unterschiedliche Kombinationen der vier Denguevirus-Subtypen und bestimmte anschließend die Viruskonzentrationen im Blut der Tiere. Es zeigte sich, dass einige Affen, die zweimal jeweils unterschiedliche Dengueviren bekommen hatten, sehr viel höhere Viruslasten aufwiesen als ihre Artgenossen.

Für dieses Phänomen lieferte der Mediziner 1977 eine mögliche Erklärung, die er »antibody-dependent enhancement« (ADE) nannte (siehe »Wie Antikörper das Denguefieber verschlimmern können«, links). Ein Denguevirus besteht aus einem Ribonukleinsäurestrang, der von einer Proteinhülle umgeben ist. Diese weist an ihrer Oberfläche zahlreiche charakteristische Wölbungen auf. Beim ersten Kontakt mit dem Virus produzieren die B-Zellen (B-Lymphozyten) des Immunsystems einen Antikörper namens Immunglobulin G, kurz IgG, der sich wie eine Klammer an eine oder mehrere Unebenheiten auf der Virusoberfläche anheftet. Sind die Antikörper so mit dem Erreger verbunden, können sie ihn zu anderen Zellen des Immunsystems, den Makrophagen, befördern. Diese nehmen den Schädling auf und verdauen ihn mit Hilfe ihrer zelleigenen Enzyme. Nach überstandenem Denguefieber gehen einige der Antikörper produzierenden B-Zellen in ein Ruhestadium über.

Infiziert sich die Person später mit einem anderen Denguevirus, werden diese Zellen erneut aktiv und produzieren fließbandartig die gleichen Antikörper, die sie gegen den ersten Erreger gebildet hatten. Halstead postulierte, dass sich einige der Antikörper zwar noch immer an die Oberfläche des ihnen unbekannten Virus binden können, aber häufig nicht dazu im Stande sind, dessen oberflächliche Proteinstrukturen – seine tödlichsten Waffen – zu blockieren. Sie liefern den Eindringling also nach wie vor an die Makrophagen aus, jedoch ohne ihn vorher »entwaffnet« zu haben. So kann das Virus diese Immunzellen befallen und mit Hilfe ihrer Ressourcen weitere Kopien seiner selbst herstellen. Durch die unbeabsichtigte Unterstützung der Antikörper kann er davon wesentlich mehr produzieren, als es ihm unter normalen Bedingungen möglich wäre.

Halsteads Fachkollegen begegneten seiner ADE-Hypothese mit einer Mischung aus Gleichgültigkeit und Zweifeln. Rund 40 Jahre später allerdings fand Eva Harris, eine Denguefieber-Spezialistin an der University of California in Berkeley, konkrete Hinweise darauf, dass der Mechanismus nicht nur existierte, sondern auch zu schweren Dengueinfektionsverläufen bei Kindern beitrug. Ursprünglich stand Harris der Theorie mit einer gewissen Skepsis gegenüber und hatte kein Interesse daran, sich an der jahrzehntealten Debatte zu beteiligen. Vielmehr untersuchte ihr Forschungsteam, zu dem unter anderem die Expertin für statistische Modellierung Leah Katzelnick gehörte, auf welche Weise das Denguevirus Kinder krank macht. Dazu beteiligten sich die Wissenschaftlerinnen am Aufbau eines Labors in Nicaragua und begannen 2004 ein äußerst ambitioniertes Projekt: eine pädiatrische Langzeit-Kohortenstudie. Harris und ihr Team in der nicaraguanischen Hauptstadt Managua standen vor der Aufgabe, den Gesundheitszustand einiger tausend Kinder über einen längeren Zeitraum zu verfolgen.

Mehr als 15 Jahre lang (die Studie läuft derzeit weiter) begleiteten sie im Rahmen der Nicaraguan Pediatric Dengue Cohort Study ihre Studienteilnehmer; sie kümmerten sich um die Kinder, wenn diese krank wurden, und besuchten deren Familien, um Daten zur Person aufzunehmen und Blutproben zu sammeln. Unter den 6684 Mädchen und Jungen identifizierten Harris und ihr Team 618, die bereits am Denguefieber erkrankt waren, und knapp 50, die schwere Krankheitssymptome entwickelt hatten. Als sie die Untersuchungsergebnisse von mehr als 41000 Blutproben durchforsteten, die sie in über zwölf Jahren gewonnen hatten, machten sie 2017 eine erstaunliche Entdeckung: Kinder, die eine mittlere Antikörperkonzentration in ihrem Blut aufwiesen – nicht so gering, dass diese wirkungslos waren, aber auch nicht hoch genug, um Schutz zu verleihen –, besaßen ein nahezu achtfach höheres Risiko, an hämorrhagischem Denguefieber und Dengue-Schocksyndrom zu erkranken.

Dieser Befund lässt sich ausgesprochen gut mit der ADE-Hypothese vereinbaren. Sind nämlich keine oder nur sehr wenige Antikörper vorhanden, können sie eine zweite Dengueinfektion nicht so verstärken, dass es zu einer schweren Erkrankung kommt. Wenn die Zahl der im Blut zirkulierenden Antikörper jedoch hoch ist, wie es kurz nach einer Primärinfektion typischerweise der Fall ist, sind diese auf Grund ihrer großen Zahl in der Lage, ein fremdes

Mehr Wissen auf **Spektrum.de**
Unser Online-Dossier zum Thema finden Sie unter
spektrum.de/t/impfen


ISTOCK / JURGAR

Denguevirus ausreichend zu bedecken und dadurch unschädlich zu machen, so dass Makrophagen es anschließend beseitigen können. Liegen allerdings die Antikörperkonzentrationen in einem laut Harris »gefährlichen Bereich«, begünstigen diese womöglich den Eintritt nicht entwaffneter Viren in Makrophagen und beschleunigen damit die Produktion neuer Krankheitserreger.

Die bahnbrechende Studie brachte sogar einige der überzeugten ADE-Gegner zum Umdenken. Und vielleicht war Harris mit ihrer unerwarteten Entdeckung auch auf die Lösung des Rätsels um den Dengueimpfstoff gestoßen.

Bereits im März 2016 hatte Halstead in einer Analyse die Hypothese aufgestellt, Dengvaxia könne bei Menschen, die noch nie mit dem Denguevirus infiziert worden waren, möglicherweise wie eine Erstinfektion wirken und den Körper genau die Menge an Antikörpern bilden lassen, die eine nachfolgende tatsächliche Infektion in eine schwere Erkrankung verwandeln. Daher forderte er, dass nur solche Kinder eine Impfung erhalten sollten, die die Krankheit bereits durchgemacht hatten.

Die Krux mit der Altersschwelle: Wie das Studiendesign zu falschen Schlüssen führte

Sanofi Pasteur legte als Kriterium, ob eine Impfung erfolgen sollte, indes das Alter der Kinder zu Grunde. Denn den vorläufigen Ergebnissen klinischer Studien zufolge war Dengvaxia für ältere Kinder weniger gefährlich als für Kleinkinder. Aus diesem Grund empfahl das Unternehmen die Impfung ab einem Alter von neun Jahren.

Auch die WHO-Impfstoff-Beratergruppe machte ihre Empfehlung an einer Altersgrenze fest. Doch im Dezember 2016 widersprach Halstead in einem Fachartikel einer Behauptung der Expertenkommission, das Risiko für geimpfte zwei- bis fünfjährige Kinder, wegen einer Dengueinfektion stationär behandelt werden zu müssen, erreiche im dritten Jahr nach der Impfung einen Höhepunkt und »verflüchtige« sich danach. Über einen längeren Zeitraum betrachtet widerlegten die Ergebnisse der klinischen Studien von Sanofi Pasteur diese Vorstellung, argumentierte Halstead. Zusammen mit anderen Fachleuten hatten Antonio und Leonila Dans die Daten jener Untersuchungen ebenfalls sorgfältig geprüft und waren zu dem Ergebnis gekommen, dass es »keine biologische Grundlage für die Festlegung einer Altersschwelle von neun Jahren« gebe, jenseits der man davon ausgehen könne, dass Dengvaxia sicher sei.

Um die Frage zu klären, ob eher das Alter oder eine bereits überstandene Infektion entscheidend sind, müsste man wissen, welche Kinder vor der Impfung mit Dengvaxia bereits eine Dengueinfektion gehabt hatten. Das hatte Sanofi jedoch lediglich bei 10 bis 20 Prozent der Impflinge überprüft. Harris machte den Forschern des Unternehmens gegenüber daher mehrfach deutlich, dass diese nicht die erforderlichen Daten erhoben hätten, um eine potenziell lebensgefährliche Wirkung des Vakzins hinreichend abschätzen zu können. Man habe sich auf absolutem Neuland bewegt und sich dabei der besten in der Impfstoffforschung bekannten Verfahren bedient, rechtfertigt sich das Pharmaunternehmen. »In vielen Impfstoffstudien werden routinemäßig nur bei 10 bis 20 Prozent der Teilnehmerinnen und Teilnehmer Blutproben genommen«, so Su-Peing Ng, Leiterin der Abteilung globale Medizin bei Sanofi Pasteur.

Nachdem der erschreckend hohe Anteil stationärer Behandlungen wegen Denguefieber ans Licht kam, entwickelte der Pharmakonzern in Zusammenarbeit mit der University of Pittsburgh ein neuartiges Verfahren, mit dessen Hilfe man auch nachträglich testen konnte, ob ein Kind vor der Impfung eine Dengueinfektion gehabt hatte. Wie dieser »Pittsburgh-Test« zeigte, ließ sich das Alter nur zum Teil als Indikator für eine frühere Infektion heranziehen – denn natürlich ist es für ein in einem Dengue-Endemiegebiet lebendes neunjähriges Kind wahrscheinlicher, bereits mit dem Erreger in Kontakt gekommen zu sein, als für ein Kleinkind.

Auf Basis dieser erneuten Überprüfung erklärte das Unternehmen im November 2017, dass nur Personen, die zuvor bereits mit dem Denguevirus infiziert worden waren, den Impfstoff Dengvaxia erhalten sollten. Einen Monat später gab die WHO dieselbe Empfehlung heraus.

Dennoch verteidigt die Organisation ihre damalige Entscheidung, die Anwendung des Impfstoffs bei älteren Kindern in besonders stark vom Denguefieber betroffenen Ländern zu empfehlen. »Wir haben die Angelegenheit äußerst gründlich, transparent und in Übereinstimmung mit den von uns herausgegebenen Verfahrensanweisungen überprüft«, erklärt Joachim Hombach, leitender Berater für Gesundheit in der Abteilung für Immunisierung, Vakzine und Biologika der WHO. »Verschiedene Alternativen denkbarer Empfehlungen wurden eingehend diskutiert, und die im Jahr 2016 veröffentlichte Impfempfehlung war ein Konsens, auf den sich die Mitglieder des Beratungsausschusses verständigt hatten.«

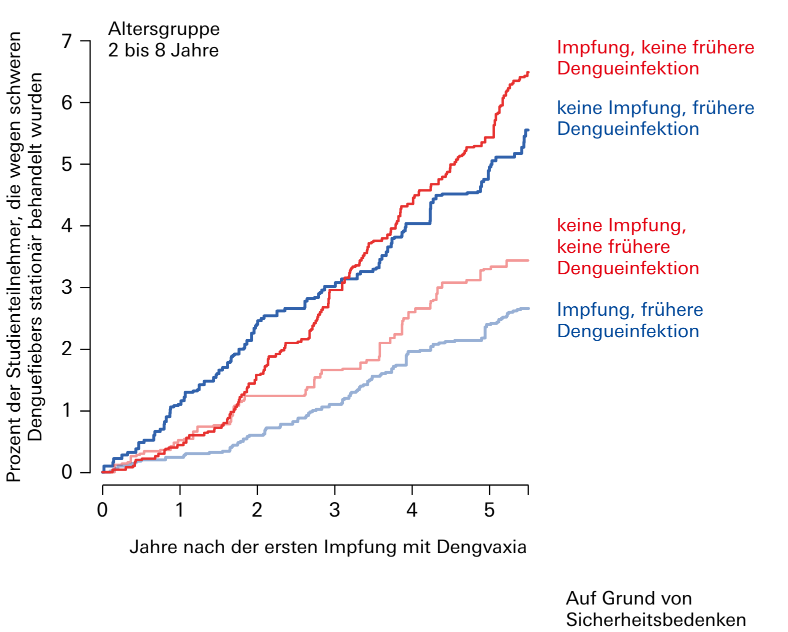
Im Juli 2018 veröffentlichte Sanofi Pasteur die erneute Datenanalyse seiner klinischen Studien. Die Überprüfung bestätigte, dass geimpfte »seronegative« Kinder, in deren Blutproben kein früherer Kontakt mit dem Denguevirus nachgewiesen wurde, ein höheres Risiko als nicht geimpfte Kinder besaßen, an einer schweren Form von Denguefieber zu erkranken und im Krankenhaus behandelt werden zu müssen. »Der Impfstoff imitiert teilweise eine Primärinfektion und erhöht das Risiko, bei einer darauf folgenden Infektion schwere Denguesymptome zu entwickeln«, schrieb das Pharmaunternehmen. Obwohl Verfechter der

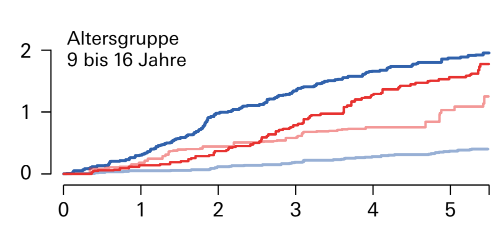
Dengue-Impfung in Europa

Seit Oktober 2018 ist Dengvaxia von der Europäischen Arzneimittelbehörde (EMA) auch für den europäischen Markt zugelassen, jedoch nur für Personen zwischen 9 und 45 Jahren, die in einem Endemiegebiet leben und zuvor bereits eine laborbestätigte Dengueinfektion durchgemacht haben. Aus diesem Grund empfiehlt die Ständige Impfkommission des Robert Koch-Instituts die Impfung nicht für Reisende.

Wie sicher ist Dengvaxia?

Mit Hilfe eines neu entwickelten Tests ermittelte Sanofi Pasteur nachträglich, welche der Kinder, die an den klinischen Studien zur Überprüfung des Impfstoffs Dengvaxia beteiligt waren, bereits vor der Impfung eine Dengueinfektion durchgemacht hatten. War ein Kind zuvor mit dem Denguevirus in Kontakt gekommen (blaue Linien), schützte es der Impfstoff äußerst wirkungsvoll vor einem schweren Verlauf. Konnte allerdings keine frühere Dengueinfektion nachgewiesen werden (rote Linien), war sein Risiko, in den Jahren nach der Impfung mit schwerem Denguefieber in ein Krankenhaus eingeliefert zu werden, viel höher als das von ungeimpften Kindern derselben Altersgruppe. Bei jüngeren Kindern (obere Abbildung), die grundsätzlich mit höherer Wahrscheinlichkeit an einem schweren Denguefieber erkranken als ältere (untere Abbildung), zeigte sich dieser Effekt noch deutlich stärker. Nach den Untersuchungen passte das Unternehmen seine Empfehlungen an.





Auf Grund von Sicherheitsbedenken bei jüngeren Kindern empfiehlt Sanofi Pasteur seinen Impfstoff Dengvaxia mittlerweile nur noch für Kinder, die älter als neun Jahre sind und nachweislich schon einmal mit dem Denguevirus infiziert waren.

AMANDA MONTAÑEZ, NACH SRIDHAR, S. ET AL.: EFFECT OF DENGUE SEROSTATUS ON DENGUE VACCINE SAFETY AND EFFICACY. NEW ENGLAND JOURNAL OF MEDICINE 379, 2018, FIG. 3 / SCIENTIFIC AMERICAN APRIL 2019

ADE-Hypothese ein derartiges Resultat vorausgesagt hatten, hieß es in der Veröffentlichung weiter: »Die immunpathogenen Mechanismen, die diesen Erkenntnissen zu Grunde liegen, sind nach wie vor unbekannt.«

Akademischer Streit, reale Probleme

Halstead wirft den bei Sanofi Pasteur tätigen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern vor, die Befunde ihrer eigenen Studien zu »verleugnen«. Ng hält dem entgegen, dass erst einmal bewiesen werden müsse, auf welche Weise ADE eine Infektion im menschlichen Körper verstärke. »ADE ist im Wesentlichen eine Beobachtung aus Laborexperimenten, ein In-vitro-Phänomen, dessen klinischer Nachweis beim Menschen noch nicht erbracht wurde. Wir wissen nicht, ob es sich bei dem zu Grunde liegenden Mechanismus wirklich um ADE handelt oder nicht«, konstatiert Ng und betont zugleich, die Gesamtwirkung von Dengvaxia auf die öffentliche Gesundheit sei nach wie vor positiv. Laut Sanofi Pasteur verringert das Vakzin die Rate schwerer Dengueerkrankungen und Krankenhausaufenthalte bei Kindern, die neun Jahre oder älter sind und bereits mit Dengue infiziert waren, um etwa 80 Prozent. Aus bislang unbekannten Gründen verleihen zwei überstandene Dengueinfektionen offenbar eine lebenslange Immunität gegen die Krankheit. Streng genommen nützt der Impfstoff also nur denjenigen, die zuvor genau einmal am Denguefieber erkrankt sind.

Ng bestreitet nicht als Einzige, dass ADE den wichtigsten ursächlichen Mechanismus einer lebensbedrohenden Dengueerkrankung darstellt. Der Gründer und ehemalige Leiter der Abteilung für Denguefieber bei der US-Behörde für Seuchenschutz und Prävention (CDC) Duane Gubler ist heute als emeritierter Professor am Emerging Infectious Diseases Program der Duke-NUS Medical School in Singapur tätig. Er weist darauf hin, dass zwei der vier Denguevirusvarianten in der Vergangenheit häufig mit schweren Epidemien in Zusammenhang standen. Der Virustyp als solcher könnte also einen mindestens so großen Einfluss auf den Verlauf einer Infektion haben wie ADE. Alan Rothman, Professor für Zell- und Molekularbiologie an der University of Rhode Island, argumentiert wiederum: T-Zellen, die Makrophagen aktivieren und entzündungsauslösende Moleküle freisetzen, seien weitaus unmittelbarer an der Entstehung eines schweren Denguefiebers beteiligt als die von B-Zellen gebildeten Antikörper.

Weil sich zunehmend mehr Menschen mit dem Denguefieber anstecken und die Erkrankung mittlerweile in weitere Regionen vordringt, wird ein sicherer Impfstoff immer dringender benötigt. Vor dem Hintergrund der jüngsten bei Sanofi Pasteur gewonnenen Erkenntnisse weisen die Ent-

wickler neuer Vakzine gegen Denguefieber ausdrücklich darauf hin, dass sie das Problem von einer anderen Seite angehen. »Bei der Planung unserer klinischen Studien haben wir die wichtigste Frage in den Mittelpunkt gestellt: Wie wirkt der Impfstoff bei Menschen, die noch nie mit dem Denguevirus in Kontakt gekommen sind?«, betont Rajeev Venkayya, Leiter des Geschäftsbereichs globale Impfstoffe beim japanischen Pharmakonzern Takeda. Das Unternehmen erprobt gerade die Wirkung seines neu entwickelten Denguevakzins an 4- bis 16-jährigen Kindern in Lateinamerika und Asien. »Als wir im Jahr 2016 mit dieser Studie begannen, waren wir uns der Bedenken hinsichtlich der Risiken für seronegative Individuen sehr wohl bewusst«, räumt Venkayya ein. »Deshalb haben wir dafür gesorgt, solche Probanden ebenfalls in unsere Studie einzubeziehen und vor Behandlungsbeginn von 100 Prozent der Teilnehmer Blutproben zu nehmen.« Im Januar 2019 gab Takeda die ersten vorläufigen Ergebnisse seiner klinischen Untersuchungen bekannt, die die Wirksamkeit des Impfstoffs bestätigten. Eine umfassende Bewertung aller Sicherheitsrisiken wird aber voraussichtlich längere Zeit in Anspruch nehmen.

Mindestens zwei weitere Vakzine gegen Denguefieber befinden sich zurzeit in der Entwicklung. An dem einen arbeiten die US-amerikanischen National Institutes of Health (NIH), am anderen das britische Pharmaunternehmen GlaxoSmithKline. Bis zu ihrer Zulassung können jedoch noch Jahre vergehen – falls sie sich tatsächlich als wirksam und sicher erweisen. Gubler ist der Meinung, dass jeder Impfstoff höchstwahrscheinlich nur gegen einige der vier verschiedenen Dengueviren gut schützen wird und weniger gegen die anderen. »Und da dem so ist, besteht immer das Risiko von ADE«, gibt der Wissenschaftler zu bedenken. »Machen wir also jetzt von diesen Vakzinen Gebrauch, oder legen wir sie auf Eis und warten weitere 50 Jahre auf den perfekten Impfstoff?« Halstead dagegen zeigt sich weitaus optimistischer: »An den NIH wird gerade ein wirklich guter Impfstoff entwickelt, der bislang praktisch alle Anforderungen in Bezug auf präklinische Wirksamkeit und menschliche Sicherheit erfüllt hat«, selbst wenn er sich noch in umfangreichen klinischen Studien bewähren muss.

Der pragmatischste Weg?

Mittlerweile ist Dengvaxia in 20 Ländern zugelassen. Im Oktober 2018 gab die US Food and Drug Administration (FDA), die amerikanische Lebens- und Arzneimittelbehörde, außerdem bekannt, sie werde der Prüfung des von Sanofi Pasteur gestellten Zulassungsantrags für Dengvaxia Priorität einräumen. Dies bedeutet, dass die USA den Einsatz des Impfstoffs in Dengue-Endemiegebieten wie beispielsweise Puerto Rico genehmigen könnte, bevor die philippinischen Behörden ihre Ermittlungen im Zusammenhang mit dem Tod der geimpften Kinder abgeschlossen haben – und bevor Sanofi Pasteur den Abschlussbericht seiner eigenen, sechs Jahre dauernden klinischen Studien vorlegt. Gubler befürwortet den Einsatz von Dengvaxia in Regionen wie Puerto Rico, wo er als Leiter der Dengueabteilung der CDC stationiert war. Seiner Ansicht nach existiert dort ein sehr viel verlässlicheres Dengue-Überwachungssystem als auf



AP PHOTO / BULLIT MARQUEZ

Geimpfte Kinder und ihre Eltern protestieren gegen die in den Jahren 2016 und 2017 auf den Philippinen durchgeführte Denguefieber-Impfkampagne.

Unter Anklage

Im Februar 2019 empfahlen der Senat und das Repräsentantenhaus der Philippinen, den ehemaligen Präsidenten Benigno Aquino, die vormalige Gesundheitsministerin Janette Garin und weitere leitende Beamte auf der Grundlage eines Antikorruptionsgesetzes wegen Unregelmäßigkeiten bei der Beschaffung und Verabreichung des Impfstoffs unter Anklage zu stellen. Mit angeklagt ist auch die Wissenschaftlerin Rose Capeding, die einige der klinischen Studien für Sanofi Pasteur geleitet hat. Darüber hinaus stellten die Familien von mehr als 30 verstorbenen Kindern Strafanzeige. Der Vorwurf lautete grob fahrlässiges Handeln, das auf Folter und Tötung hinauslief.

den Philippinen. Dazu gehören beispielsweise Ärzte, die die geimpften Personen regelmäßig kontrollieren und bei eventuellen Anzeichen schweren Denguefiebers umgehend in ein Krankenhaus einweisen. »Ich bin dafür, das Mittel in hochgradigen Endemiegebieten ohne entsprechende Voruntersuchungen einzusetzen, denn ich glaube, dass das Risiko von ADE mit einer guten Krankheitsüberwachung und der notwendigen medizinischen Versorgung auf ein Minimum reduziert werden kann«, argumentiert er.

»Dieses Vakzin ist ein gesundheitsschädliches Produkt, wenn es nicht ausschließlich bei nachgewiesenermaßen seropositiven Personen angewandt wird«, beharrt dagegen Halstead. Der Nachweis einer früheren Dengueinfektion erfordert jedoch Laboruntersuchungen, die in vielen Teilen der Welt, in denen Denguefieber immer wieder auftritt, nicht unbedingt ohne Weiteres durchführbar sind. Umstritten ist in diesem Zusammenhang auch eine im September 2018 herausgegebene Empfehlung der WHO. Laut ihr ist die Überprüfung auf eine bereits durchgemachte Dengueerkrankung vor der Impfung zwar wünschenswert; wenn aber ein solcher Test aus praktischen Gründen nicht machbar ist, könnten die betreffenden Länder eine Verabreichung von Dengvaxia in Gebieten mit einem Dengueausbreitungsgrad von 80 Prozent oder mehr bei Personen ab einem Alter von neun Jahren durchaus in Betracht ziehen.

Auf die Frage nach der ethischen Begründung dieser Entscheidung entgegnete Joachim Hombach, die WHO habe die Vor- und Nachteile sorgfältig abgewogen und außerdem darauf hingewiesen, dass eine solche Kampagne von einer »vollständigen Aufklärung über die Risiken einer Impfung von Personen mit unbekanntem Serostatus begleitet werden sollte«. Es könnte sich jedoch als schwierig erweisen, derartig komplexe Sachverhalte den Menschen in ethnisch vielfältigen Ländern verständlich zu erklären, wo viele Einheimische die Sprache der WHO-Vertreter nicht verstehen oder die entsprechenden Informationen nicht lesen können. Sanofi Pasteur dagegen äußert sich zurückhaltender. Die Unternehmenssprecherin Karen Batoosingh erklärt, »der Impfstoff sollte Menschen mit einer bereits durchgemachten Dengueinfektion zur Verfügung stehen, um diese bei nachfolgenden Infektionen mit dem Denguevirus zu schützen«. Zudem sei das Unternehmen bemüht, »einen neuen Schnelltest für Denguefieber zu entwickeln, um allen Menschen, die von seiner schützenden Wirkung profitieren könnten, einen problemlosen Zugang zu dem Vakzin zu ermöglichen«.

Halstead sieht aber noch ein weiteres Problem: Da die Antikörperkonzentrationen im Blut der geimpften, ursprünglich seronegativen Personen im Lauf der Zeit sinken, erreichen sie irgendwann ein mittleres Niveau, welches das Auftreten von ADE immer wahrscheinlicher werden lässt. Diese Menschen werden also zunehmend anfälliger dafür, bei einer Infektion mit dem Denguevirus eine gefährliche Form der Erkrankung zu entwickeln. In seinen klinischen Studien hatte Sanofi Pasteur herausgefunden, dass von 1000 seronegativen Kindern, denen Dengvaxia verabreicht wurde, fünf wegen Denguefieber in ein Krankenhaus eingewiesen werden mussten und zwei von ihnen schwere Krankheitssymptome entwickelten. Mit Hilfe dieser Zahlen berechnete Halstead, dass künftig womöglich mehr als 4000 Kinder wegen einer durch den Impfstoff verstärkten Dengueerkrankung in philippinischen Krankenhäusern behandelt werden müssen. Mit der Frage konfrontiert, wie man die vielen für ADE sensibilisierten Menschen in Zukunft schützen wolle, entgegnete Ng, es sei unklar, ob die Fälle von schwerem Denguefieber in der Gruppe der geimpften Kinder auf ein Versagen des Impfstoffs oder auf ADE zurückzuführen seien. Alle Menschen sollten sich vor Stechmücken schützen, hinsichtlich erster Anzeichen einer Dengueerkrankung überwacht werden und sich beim Auftreten schwerer Symptome umgehend in medizinische Behandlung begeben.

Impfstoffe haben bereits unzähligen Menschen das Leben gerettet. Die natürlich auftretenden Pocken sind ausgerottet, die Poliomyelitis scheint nahezu besiegt, und auch Tetanus und Tollwut haben ihren Schrecken weitgehend verloren. Trotz all dieser Errungenschaften ist eine wachsende Angst vor Impfstoffen zu beobachten, die Millionen Kinder dem Risiko vermeidbarer Erkrankungen aussetzt. So haben seit dem Streit um Dengvaxia mehrere Masernepidemien die Philippinen heimgesucht, weil Eltern zu verängstigt waren, ihre Kinder dagegen impfen zu lassen. Diese zunehmende Skepsis gegenüber Vakzinen ist fast immer auf Fehlinformationen zurückzuführen. Gleichwohl macht der Fall Dengvaxia die schöne Geschichte, in der aufrichtige Wissenschaftler gegen Unwissenheit und Vorurteile kämpfen, um die Welt für die Menschen sicherer zu machen, ein bisschen komplizierter. ◂

QUELLEN

Halstead, S. B. (Hg.): Dengue. Tropical medicine. Science and Practice 5, 2008

Halstead, S. B.: Dengue antibody-dependent enhancement: Knowns and unknowns. Microbiology Spectrum 2, 2014

Sridhar, S. et al.: Effect of Dengue serostatus on Dengue vaccine safety and efficacy. New England Journal of Medicine 379, 2018

BOTANIK

DER LANGE WEG ZUR TEEKULTUR

Genetische Untersuchungen an Teepflanzen geben Aufschluss darüber, warum und wie diese domestiziert wurden.



Liam Drew ist Neurobiologe und Wissenschaftsautor in London.

⏩ spektrum.de/artikel/1675648



Teepflückerinnen bei der Ernte im indischen Assam.

DANIELRAO / GETTY IMAGES / ISTOCK

Legenden besagen, der buddhistische Mönch Bodhidharma habe um das Jahr 500 n. Chr. ganze neun Jahre damit verbracht, die Wand einer Höhle anzustarren und dabei schweigend zu meditieren, um wach und konzentriert zu bleiben. Am Ende jedoch sei er eingedöst, und als er wieder aufwachte, sei er so wütend auf sich gewesen, dass er seine Augenlider abriss und angewidert auf den Boden schleuderte. Aus ihnen spross eine Pflanze empor, und diese verarbeiteten Bodhidharmas Schüler zu einem Getränk, das sowohl ihren Geist anregte als auch ihre Nerven beruhigte. Es sei die erste Teepflanze gewesen, und das Getränk daraus habe sich als ideal für meditierende Mönche erwiesen.

So weit der Mythos. Das Genom der Teepflanze *(Camellia sinensis)*, das 2017 vollständig sequenziert wurde, erzählt eine andere Geschichte. Auf seiner Grundlage können Wissenschaftler weitaus plausibler darlegen, wie *C. sinensis* von einem Gewächs, das in China wild wucherte, zu einer Nutzpflanze avancierte, die heute das weltweit zweitbeliebteste Getränk nach Wasser liefert. Tag für Tag nehmen Menschen rund zwei Milliarden Tassen Tee zu sich. Die Pflanze wird in mehr als 60 Ländern kommerziell angebaut; der jährliche Ernteertrag beläuft sich auf etwa fünf Millionen Tonnen Blätter – gepflückt oder abgeschnitten von den jeweils frischesten Trieben.

Der wissenschaftliche Name spiegelt die Herkunft der Teepflanze wider. »Camellia« weist darauf hin, dass es sich um ein immergrünes holziges Gewächs handelt – eng verwandt mit Blüten tragenden Zierbüschen, die in vielen Gärten zu finden sind. Der Zusatz »sinensis« hebt den chinesischen Ursprung hervor.

Wie sich Anbau, Verarbeitung und Nutzung des Tees von China aus über den Globus verbreitet haben, ist gut dokumentiert. Um das Jahr 1200 brachte ein buddhistischer Mönch die Kulturtechnik nach Japan. 1610 kam sie mit den Niederländern nach Europa; etwa 50 Jahre später entwickelten die Engländer eine Vorliebe für Tee. Bis zur Mitte des 19. Jahrhunderts belieferte China die westlichen Länder damit, doch nach jahrzehntelangen Spannungen, die schließlich in den Opiumkriegen gipfelten, forcierten die Briten den Anbau in Indien. Von dort nahm das Erzeugnis seinen Weg ins gesamte britische Empire und darüber hinaus.

Schwieriger ist festzustellen, wann, wie und warum Tee erstmals domestiziert wurde. Denn das geschah, bevor es zuverlässige schriftliche Aufzeichnungen gab. Einige Forscher nehmen an, er sei in China schon vor 3500 bis 4000 Jahren genutzt worden – wegen seiner mild anregenden Eigenschaften wahrscheinlich zunächst als Arzneikraut. Erst später lernte man ihn als wohlschmeckendes Getränk zu schätzen. »Erstmals eindeutig schriftlich erwähnt wird er in einem rund 2000 Jahre alten Arbeitsvertrag«, sagt der Historiker Lawrence Zhang von der Hong Kong University of Science and Technology. »Laut diesem Dokument gehörte es zu den Aufgaben eines Dieners, den Markt aufzusuchen und dort Tee für den Dienstherrn zu erwerben.«



DANIELRAO / GETTY IMAGES / ISTOCK

AUF EINEN BLICK
VERWORRENE HERKUNFT

1. Tee, das zweitbeliebteste Getränk der Welt nach Wasser, ist ein Aufguss der Kulturpflanze *Camellia sinensis.*
2. Wann dieses Gewächs domestiziert wurde, ist rätselhaft. Neuere Studien scheinen zu belegen, dass es vor vielen Jahrtausenden in China geschah.
3. Mit genetischen Analysen, historischen und archäologischen Untersuchungen versuchen Forscher, die Geschichte der Teepflanze aufzuklären.

In eine ähnliche Zeit fallen die ältesten archäologischen Belege für Teekonsum. 2016 fand ein Team um Houyuan Lu von der Chinesischen Akademie der Wissenschaften charakteristische molekulare Bestandteile von *C. sinensis* in 2100 Jahre alten pflanzlichen Überresten aus der ehemaligen Stadt Chang'an, dem einstigen Anlaufpunkt der Seidenstraße. Um noch weiter in die Vergangenheit des Tees vorzudringen und die Zeit seiner frühen Domestikation auszuleuchten, analysieren Biologen das Erbgut heutiger Pflanzen.

Unter künstlicher Selektion

Die Vorstellung, wilde Gewächse würden zu bestimmten Zeitpunkten in Nutzpflanzen umgewandelt, ist zu simpel. »Gewöhnlich folgt auf eine frühe Domestikation eine lange Phase der Verbesserung«, bekräftigt Jonathan Wendel, Spezialist für Pflanzenevolution an der Iowa State University in Ames. »Auch bei vielen gegenwärtigen Kulturformen ist diese Optimierung noch nicht abgeschlossen.«

Alle heutigen Nutzpflanzen haben einst in der Wildform das Interesse von Menschen auf sich gezogen – etwa wegen ihrer Früchte oder Blätter. Unsere Vorfahren begannen die Gewächse dann zum eigenen Vorteil zu kultivieren. Ob bewusst oder unbewusst: Die Züchter vermehrten ab diesem Zeitpunkt bevorzugt jene Exemplare, die am stärksten die jeweils gewünschten Eigenschaften aufwiesen. So unterzogen sie die Spezies einer künstlichen Selektion. In aller Regel führte das dazu, dass die Arten sich im Lauf der Zeit deutlich veränderten. Die Teosinte zum Beispiel, die wilde Vorläuferin des kultivierten Maises, ist ein stark verzweigtes Süßgras mit zahlreichen winzigen Ähren. Sie unterscheidet sich markant vom Kulturmais mit seinen kräftigen einzelnen Stängeln, die nur wenige große Ähren hervorbringen. Es gibt freilich auch weniger drastische Beispiele: Kultivierte Paranüsse etwa sehen ihren wilden Vorfahren sehr ähnlich.

Die Ursprünge des Tees sind unter anderem deshalb schwer aufzuklären, weil es bis heute nicht gelungen ist, die Wildform von *C. sinensis* eindeutig zu identifizieren. Enge Verwandte der Spezies gedeihen in China und den Nachbarländern, gehören aber offensichtlich zu anderen Arten. Und von den bisher gefundenen wild wachsenden *C. sinensis* glauben die meisten Forscher, dass diese von der Kulturform abstammen.

Bei vielen anderen Nutzpflanzen ist die Situation ähnlich. »Zu den meisten unserer domestizierten Gewächse finden wir nicht die Wildform«, so Wendel. Dafür gebe es viele mögliche Gründe – der wilde Vorläufer könne beispielsweise schon immer selten gewesen und mittlerweile ausgestorben sein. Ob das beim Tee auch der Fall war, ist unklar. Jedenfalls wissen die Forscher nicht, von welchem Organismus seine Domestikation ausging. Daher können sie

auch nicht sagen, welche Merkmale der Kulturpflanze angezüchtet wurden und welche bereits vorher da waren. Die Wissenschaftler müssen versuchen, das aus dem Genom und anderen biologischen Eigenschaften von *C. sinensis* herauszulesen.

Beim Züchten der Teepflanze haben unsere Vorfahren vermutlich auf Merkmale wie einen höheren Ertrag selektiert. Wahrscheinlich bevorzugten sie Exemplare, die über die Jahreszeiten hinweg ein gleich bleibendes Wachstum aufwiesen und gegenüber Hitze wie Kälte weitgehend unempfindlich waren. Mit Sicherheit spielte zudem eine Rolle, welche geschmacklich relevanten Substanzen die Gewächse produzierten. »Die Qualität von Tee hängt maßgeblich von seinen sekundären Pflanzenstoffen ab – und die sind wichtig für die Überlebensfähigkeit der Gewächse«, sagt der Ökologe Colin Orians von der Tufts University in Medford, Massachusetts. Sekundäre Pflanzenstoffe dienen beispielsweise als Abwehrmittel gegen Fressfeinde (siehe **Spektrum** April 2016, S. 28).

Nicht von jedem Inhaltsstoff des Tees lässt sich mit Gewissheit sagen, welchen evolutionären Vorteil er der Pflanze verschafft. Einige allgemeine Prinzipien gebe es aber schon, betont Orians. Das Koffein, das dem Getränk seine anregende Wirkung verleiht, ist für Insekten und andere Wirbellose ein Nervengift und wirkt zudem antimikrobiell. Die Catechine – sekundäre Pflanzenstoffe, die zum bitteren Geschmack des Tees beitragen und viele seiner gesundheitlich günstigen Wirkungen vermitteln – gehören zur Gruppe der Flavonoide und haben antioxidative Eigenschaften. Sie helfen den Gewächsen, mit oxidativem Stress (beispielsweise infolge von UV-Einstrahlung) zurechtzukommen. Manche bieten auch Schutz vor Pflanzenfressern. L-Theanin schließlich, eine Aminosäure, die Stressreaktionen im Zentralnervensystem dämpft und beruhigend wirkt, beteiligt sich in der Pflanze vermutlich an der biochemischen Umsetzung von Stickstoff und am Wachstum.

Als Tee noch kaum genießbar war

Irgendeine Kombination dieser Verbindungen machte den wilden Vorläufer der Teepflanze einst für Menschen interessant, aber seit damals dürften sich ihre Mengenverhältnisse infolge der Zucht stark verändert haben. »Für mich steht außer Zweifel, dass unsere Vorfahren das Gewächs anfangs vor allem wegen des Koffeingehalts mochten«, meint Orians. Dokumente aus dem 8. Jahrhundert belegen, dass Tee damals häufig mit geschmacksintensiven Zutaten wie Zwiebeln, Ingwer, Salz oder Orangen bereitet wurde, was darauf schließen lässt, dass er pur kaum genießbar war. Sein Geschmack verbesserte sich mittels innovativer Methoden, die Blätter zu verarbeiten; diese neuen Verfahren erlaubten es, aus ein und derselben Pflanze so unterschiedliche Getränke wie grünen, weißen, schwarzen oder Oolong-Tee herzustellen. Wahrscheinlich gelang es den Züchtern unabhängig davon, auf angenehmere Aromen hin zu selektieren. Noch heute experimentieren sie mit neuen Sorten. Wann der Geschmack aber zum maßgeblichen Zuchtkriterium wurde, ist nicht geklärt.

In den zurückliegenden 20 Jahren haben genetische Analysen uns viel darüber verraten, woher Nutzpflanzen wie Mais, Oliven und Reis stammen. Nun werfen sie ein neues Licht auf die Herkunft des Tees. Mit fortschreitender Domestikation unterscheiden sich Pflanzen genetisch immer stärker von ihren wilden Vorfahren. In ihnen sammeln sich Gensequenzen an, die jene phänotypischen Merkmale hervorbringen, welche der Züchter bevorzugt. Damit werden auch Chromosomenabschnitte häufiger, die in der Nähe dieser Sequenzen liegen und gemeinsam mit ihnen verbreitet werden. Außerdem häufen sich nach und nach zufällig eingetretene Mutationen. All dies führt dazu, dass jede Pflanzensorte, die der Züchter von anderen getrennt hält, mit der Zeit ihr eigenes genetisches Profil entwickelt. Ist kein wilder Vorfahre verfügbar, mit dem man sie vergleichen kann, lassen sich diese Unterschiede nicht direkt beobachten. Genetiker können dennoch gewisse Rückschlüsse auf die Vergangenheit ziehen, indem sie das Erbgut heutiger Sorten untersuchen und die Ergebnisse einander gegenüberstellen.

Ein solcher Vergleich zeigt zuverlässig an, wie eng zwei Sorten miteinander verwandt sind. Denn je mehr sie sich genetisch ähneln, desto weniger Zeit ist vergangen, seit ihr letzter gemeinsamer Vorfahre gelebt hat. Erbgutanalysen liefern somit wissenschaftlich fundierte Stammbäume heutiger Kulturpflanzen. Erschwert wird das Ganze zwar dadurch, dass Züchter verschiedene Sorten oft kreuzen und



Im südchinesischen Shaxian suchen der Ökologe Colin Orians (mit Kamera) und seine Kollegen nach grünen Teezikaden – Insekten, die die Blätter der Pflanzen schädigen (kleines Bild).

Erbgutanalysen liefern aufschlussreiche Stammbäume der heutigen Teepflanzen



ERIC R. SCOTT; MIT FRDL. GEN. VON NATURE

deren Chromosomen dabei durcheinanderwürfeln. Die hierbei entstehenden Hybriden haben aber in der Regel ein Erbgut, das eindeutig als Mischung zweier verschiedener elterlicher Genome erkennbar ist.

Genetiker können heute feststellen, welche Abschnitte des Teepflanzengenoms durch die Zucht begünstigt wurden. Wenn bestimmte Erbanlagen sich in einer Population verbreiten, weil sie ihren Trägerpflanzen vorteilhafte Eigenschaften verleihen und die Bauern deshalb gezielt entsprechende Gewächse zur Weiterzucht auswählen, dann nehmen diese Erbanlagen benachbarte Regionen auf ihren Chromosomen quasi im Schlepptau mit. Infolgedessen verbreiten sich auch diese Abschnitte in der Population; die verschiedenen Individuen werden sich in jenen Chromosomenbereichen somit ähnlicher. Für Genetiker ist die geringe Variabilität eines Chromosomenabschnitts deshalb ein sicheres Zeichen dafür, dass darin ein oder mehrere Gene liegen, die ihren Trägern günstige Merkmale vermitteln.

Bereits seit 20 Jahren versuchen Wissenschaftler mit genetischen Methoden, die Verwandtschaftsbeziehungen zwischen verschiedenen Sorten, so genannten Kultivaren, der Teepflanze aufzuklären. Heute gibt es ungefähr 1500 Kultivare, die man auf diverse Weisen in Gruppen einteilt. Die offensichtlichste Trennlinie verläuft zwischen Chinasaatpflanze (*C. sinensis* var. *sinensis*) und Assamsaatpflanze (*C. sinensis* var. *assamica*), Letztere benannt nach der indischen Region, in der sie erstmals angebaut wurde. Chinesischer Tee hat kleinere Blätter und verträgt Kälte besser. Assamtee wird in China wenig kultiviert, dafür umso mehr in Indien und anderen warmen Ländern. Welche Verwandtschaftsbeziehungen zwischen diesen beiden Gruppen bestehen, war lange unklar. Rätselhaft erschien auch, inwiefern andere Varianten wie der Khmer-Tee mit ihnen verwandt sind.

Antworten hierauf haben Arbeiten unter Leitung des Pflanzengenetikers Lianming Gao von der Chinesischen Akademie der Wissenschaften im Jahr 2016 geliefert. Demnach gibt es unter den Teepflanzen drei verschiedene genetische Abstammungslinien. Gaos Team postuliert daher, die Gewächse seien dreimal unabhängig voneinander domestiziert worden. Die erste Linie sei der chinesische Tee, der vermutlich aus Südchina stamme. Die beiden anderen Linien seien dem Assamtee zuzurechnen: eine chinesische aus der südwestlichen Provinz Yunnan und eine indische aus der Region Assam. Zudem zeigten die Daten, dass Khmer-Tee kein eigenständiger Zweig sei, sondern eine Hybride aus *Assamica*- und *Sinensis*-Kultivaren.

Gaos erste Befunde basierten auf Untersuchungen an Genomfragmenten, die von 300 Teeproben aus China und 92 Proben aus Indien stammten. Sein Team erhärtete die Ergebnisse später in zwei weiteren Studien anhand von Chloroplasten-DNA und weiterentwickelten Sequenzierungstechniken. Die Vermutung, chinesischer Tee und Assamtee seien unterschiedlichen Ursprungs, gibt es schon lange. Dass dem letzten aber zwei verschiedene, getrennt domestizierte Abstammungslinien angehören, ist eine umstrittene These.

Gestützt auf die Sequenzdaten schätzten die Forscher um Gao, wann sich die drei von ihnen identifizierten Linien auseinanderentwickelt haben. Setzt man die genetischen Unterschiede zwischen den Kultivaren in Beziehung zur Geschwindigkeit, mit der sich Mutationen natürlicherweise in den Pflanzen ansammeln, kann man ausrechnen, wann ihr letzter gemeinsamer Vorfahre ungefähr gelebt hat. Demnach trennte sich die *Sinensis*- von der *Assamica*-Linie vor rund 22 000 Jahren, also lange vor dem mutmaßlichen Zeitpunkt der ersten Domestikation. Das stützt die Annahme, zwei verschiedene Populationen von Wildpflanzen seien unabhängig voneinander domestiziert worden.

Drei verschiedene Genpools

Die chinesische und die indische *Assamica*-Linie spalteten sich den Daten zufolge viel später voneinander ab, nämlich vor rund 2800 Jahren. Das wirft auch für sie die Frage auf, ob sie den Veränderungsprozess hin zu Nutzpflanzen separat durchliefen. Alternativ ist denkbar, dass die *Assamica*-Variante nur einmal domestiziert wurde, sich aber später überregional verbreitete, so dass sie sich in verschiedenen Gegenden jeweils eigenständig weiterentwickelte. »Die Daten belegen die Existenz dreier verschiedener Genpools«, sagt Jonathan Wendel, »aber das spricht keineswegs für drei getrennte Domestikationsprozesse.«

Der Biochemiker Xiaochun Wan von der Anhui Agricultural University in Hefei (China) teilt diese Skepsis. Wans Team veröffentlichte 2016 eine Studie über die Verwandtschaftsbeziehungen zwischen Teekultivaren. Die Forscher stützten sich hierbei ebenfalls auf die Analyse von Genomfragmenten und konnten eindeutig eine Abspaltung der *Sinensis*-Linie von wilden Pflanzenspezies nachweisen. Außerdem zeigten sie, dass der *Sinensis*- und der *Assamica*-Zweig zwei genetisch unterscheidbare Gruppen darstellen. Die chinesische und die indische *Assamica*-Linie verglich das Team freilich nicht.

Die Forscher um Wan suchten nach genetischen Spuren des Zuchtprozesses, dem die domestizierten Teepflanzen unterworfen waren. Den vorläufigen Ergebnissen zufolge sind die Gewächse unter anderem auf Enzyme hin selektiert worden, die an der Produktion sekundärer Pflanzenstoffe mitwirken, darunter des Koffeins. Wegen der ständigen Weiterentwicklung der Analysemethoden seien hierzu aber künftig belastbarere Aussagen zu erwarten, kündigt Wendel an.

Eine vollständige Genomsequenz von *C. sinensis* var. *assamica* ist 2017 veröffentlicht worden; im Jahr darauf publizierte Wans Team vorläufige Sequenzdaten von *C. sinensis* var. *sinensis*. Diese Informationen erlauben unter anderem neue Einblicke in die Evolution der Koffeinbiosynthese. Forscher erhoffen sich von ihnen detailliertere Aussagen darüber, was die diversen Kultivare unterscheidet beziehungsweise verbindet. Zunächst einmal hat der Vergleich der vollständigen Genomsequenzen überraschend ergeben, dass die *Assamica*- und die *Sinensis*-Linie sich schon viel früher auseinanderentwickelt haben als von Gaos Team vermutet: Eine erste Schätzung verlegt die Trennung in die Zeit vor 380000 bis vor 1500000 Jahren.

Das Volk der Singpho könnte die Teepflanze zum zweiten Mal domestiziert haben

Vor dem Hintergrund solcher Untersuchungen sind geschichtliche Rückblicke sehr interessant – beispielsweise ins 19. Jahrhundert, als die Briten erstmals Tee in Indien anbauten. Entscheidende Fortschritte hierbei erzielten sie in den 1840er Jahren, als der schottische Botaniker Robert Fortune Teepflanzen aus China stahl und auf indischen Plantagen kultivierte, wobei er sich von chinesischen Teebauern unterstützen ließ.

Zur Zeit dieses Pflanzenraubs betrieben die Briten in Indien bereits einen begrenzten Teeanbau, allerdings mit der *Assamica*-Variante. Robert Bruce, auch er ein Schotte, war 1823 durch das Tal von Assam gereist und hatte dort von einer weithin unbekannten wilden Teesorte erfahren, die vom indigenen Volk der Singpho angebaut und konsumiert wurde – manchmal als Gemüse, manchmal als fermentiertes Getränk. Da diese Gewächse größere Blätter hatten als jene aus China, die Bruce kannte, war sich der Schotte nicht sicher, ob es sich um echten Tee handelte. Nach seinem Tod im Jahr 1824 begann sein Bruder Charles Bruce damit, jene Sorte, den so genannten Assamtee, in Indien anzubauen – mehr als zehn Jahre vor Fortunes Diebstahl.

Das Volk der Singpho könnte die Teepflanze somit zum zweiten Mal domestiziert haben, nachdem dies lange zuvor bei der *Sinensis*-Linie geschehen war. Möglich ist freilich auch, dass einwandernde Stämme wie die Shan das kultivierte Gewächs von woandersher nach Assam brachten. Es lässt sich nicht einmal ausschließen, dass Assamtee ursprünglich in China zur Nutzpflanze gemacht wurde. Da die chinesische Provinz Yunnan, in der Bauern entsprechende Kultivare noch heute anbauen, weniger als 1000 Kilometer von Assam entfernt liegt, erscheint ein früher landwirtschaftlicher Austausch zwischen diesen beiden Regionen durchaus möglich. Genetische Analysen werden die Verwandtschaftsbeziehungen zwischen den *Assamica*-Kultivaren in Zukunft hoffentlich aufklären. Sie sollten aber immer zusammen mit geschichtlichen und archäologischen Untersuchungen erfolgen.

Köstlicher Abwehrstoff gegen Insekten

Nach wie vor arbeiten Teezüchter daran, bestehende Sorten zu veredeln und neue zu kreieren. Eric Scott, der an der Tufts University zusammen mit Colin Orians die Abwehrmechanismen von Pflanzen erforscht, verbrachte den Sommer 2017 bei der Teefirma Shanfu im chinesischen Shaixan. Dort erfuhr er, welche teils ungewöhnlichen Methoden die Züchter hierbei anwenden.

Die grüne Teezikade *(Empoasca onukii)* beispielsweise ist ein Insekt, das die Gewächse befällt und sie frisst. Die betroffenen Pflanzenteile haben die Bauern lange Zeit weggeworfen. In den 1930er Jahren fanden Farmer in Taiwan jedoch heraus: Die überlebenden Blätter liefern einen ausgezeichneten Tee. Denn wenn die Pflanzen von den Zikaden attackiert werden, geben sie Signalsubstanzen ab, die Springspinnen anlocken – natürliche Feinde der Zikaden. »Diese Substanzen vermitteln eine köstliche Geschmacksempfindung«, beschreibt Scott. »Sie haben ein wirklich schönes, honigähnliches und fruchtiges Aroma, das die Qualität des Tees erheblich steigert.« Die entsprechende Sorte mit der Bezeichnung Eastern Beauty ist derzeit schwer in Mode. Daher versuchen die Züchter herauszufinden, welche Kultivare sich auf Grund ihrer spezifischen Insektenabwehrmechanismen am besten für die Herstellung eignen.

Scott betont, dies sei nur ein Beispiel dafür, wie Bauern neue, veredelte Erzeugnisse schaffen. Andere Züchter arbeiten hierfür mit theaninreichen, catechinarmen Albino-Mutanten oder Kultivaren mit violetten Blättern. »Das Feld ist ständig in Bewegung«, resümiert er. Die Domestikation des Tees ist noch lange nicht zu Ende. ◂

QUELLEN

Houyuan, L. et al.: Earliest tea as evidence for one branch of the Silk Road across the Tibetan Plateau. Scientific Reports 6, 2016

Wei, C. et al.: Draft genome sequence of Camellia sinensis var. sinensis provides insights into the evolution of the tea genome and tea quality. PNAS 115, 2018

Xia, E.H. et al.: The tea tree genome provides insights into tea flavor and independent evolution of caffeine biosynthesis. Molecular Plant 10, 2017

Yang, H. et al.: Genetic divergence between Camellia sinensis and its wild relatives revealed via genome-wide SNPs from RAD sequencing. PLoS One 11, 2016

Nature 566, S. S2–S4, 2019

MEDIZIN

TEE GEGEN TUMOREN

Seit Jahrzehnten erforschen Wissenschaftler die Krebs hemmenden Eigenschaften des grünen Tees. Der tatsächliche medizinische Nutzen ist bislang jedoch unklar.



Michael Eisenstein ist Wissenschaftsautor in Philadelphia (Pennsylvania).

spektrum.de/artikel/1675650

Eine belebende Tasse Tee gehört für viele Menschen zu den Freuden des Lebens. Vielleicht bietet sie aber noch viel mehr: Es gibt Anzeichen dafür, dass einige chemische Bestandteile des Tees vor Krebserkrankungen schützen. Allerdings sind diese Hinweise eher vage, denn auch nach jahrzehntelanger Forschung mittels epidemiologischer Untersuchungen und klinischer Studien scheint die Lage alles andere als klar.

Erste Hinweise darauf, dass Tee – insbesondere seine grüne Variante – Krebserkrankungen vorbeugt, ergaben sich aus regionalen Unterschieden in deren Häufigkeit. Forscher gingen damals der Frage nach, ob diese Differenzen mit der Lebensweise zusammenhängen. »Bevölkerungsstudien haben eindeutig gezeigt, dass Prostatakrebs in asiatischen Ländern seltener diagnostiziert wird als anderswo – vor allem in Japan und China, deren Einwohner 35 Prozent des weltweit konsumierten Tees trinken«, sagt Nagi Kumar, Onkologin am Moffitt Cancer Center in Tampa (Florida). »Diese ersten Erhebungen machten uns neugierig, was dahintersteckt.«

Frühe epidemiologische Untersuchungen in den 1980er und 1990er Jahren erwiesen sich als kaum interpretierbar und lieferten widersprüchliche Ergebnisse. Aufschlussreicher waren Experimente, in denen Forscher die pharmazeutischen Wirkungen von Teeinhaltsstoffen auf Krebszellen analysierten. »Diese Stoffe haben klare Effekte in Zellkultu-

Grüner Tee enthält Verbindungen namens Catechine, die gesundheitlich günstig auf den Organismus wirken können, indem sie etwa oxidativem Stress entgegenwirken.

CHIOCIOLLA / GETTY IMAGES / ISTOCK

ren und Versuchstieren hervorgerufen«, erläutert der Krebsmediziner Hasan Mukhtar von der University of Wisconsin-Madison.

Klinische Studien hingegen, also solche mit menschlichen Patienten, haben oft verwirrende Ergebnisse geliefert oder allenfalls schwache Wirkungen belegt. Das dämpfte den anfänglichen Enthusiasmus der Wissenschaftler schon bald. »Wenn ich gefragt werde, ob Tee dem Krebs vorbeugt, sage ich: ja, nein und vielleicht«, resümiert Chung Yang von der Rutgers University in Piscataway, New Jersey. Er befasst sich seit mehr als 30 Jahren mit einschlägigen pharmazeutischen Effekten. »Die Tierversuche sind sehr eindeutig, aber bei Menschen kann man keine klaren Schlussfolgerungen ziehen.«

Die physiologischen Wirkungen grünen Tees lassen sich vorwiegend auf Substanzen aus der Stoffgruppe der Catechine zurückführen. Die wichtigste davon ist das Epigallocatechingallat (EGCG), das durchschnittlich 60 bis 65 Prozent der Catechine im zubereiteten Getränk ausmacht und bis zu zehnfach höher konzentriert vorliegt als Koffein. EGCG hat sowohl auf Krebszellkulturen als auch auf Tumoren bei Mäusen eine klare wachstumshemmende Wirkung (zu den mutmaßlichen Mechanismen dahinter siehe »Wider den Krebs«, rechts). »Die Substanz hat sich in Tierversuchen als außerordentlich aktiv erwiesen«, sagt Yang. Eine Dosis ähnlich jener, die bei Nagern wirkte, dürfte bei Menschen allerdings schwer zu erreichen sein. In manchen Studien erhielten die Tiere während des gesamten Experiments nichts anderes zu trinken als grünen Tee oder catechinhaltige Lösungen.

EGCG hat zu diversen Biomolekülen eine starke Affinität, wie Yang betont. Wegen dieser wenig wählerischen Bindungsfreudigkeit beeinflusst die Substanz zahlreiche Prozesse der Krebsentstehung. Häufig bringt sie Tumorzellen dazu, sich in einem Prozess namens Apoptose selbst zu zerstören, während benachbartes gesundes Körpergewebe verschont bleibt. Kumar vermutet, dass EGCG dies erreicht, indem es das Proteasom hemmt – einen Enzymkomplex, den Krebszellen für den Abbau von Biomolekülen nutzen, die sonst Apoptose auslösen würden. EGCG und andere Catechine sind zudem Antioxidanzien, neutralisieren also reaktionsfreudige Sauerstoffverbindungen (ROS), die in den Zellen schwere Schäden anrichten und die Tumorentstehung vorantreiben können.

Wie diese verschiedenen Mechanismen zusammenwirken, um den Antitumoreffekt von EGCG hervorzurufen, lässt sich nur schwer entwirren. Doch der potenzielle medizinische Nutzen wurde in zahlreichen vorklinischen Studien belegt. Eine Übersichtsarbeit von Yang hat 2009 ergeben: In 133 von 147 veröffentlichten Studien bekamen Tiere, die Tee oder Teeextrakte erhielten, entweder seltener Tumoren oder diese wuchsen langsamer – und dies bei einem breiten Spektrum von Krebserkrankungen. Das lässt sich freilich nicht nur auf EGCG zurückführen, denn die Substanz allein beeinflusst Zellkulturen sehr stark, aber offenbar nicht den Gesamtorganismus (in vivo). »Isoliertes EGCG hat in vivo keine Wirkung«, erläutert Kumar, »hier löst es nur zusammen mit anderen Catechinen einen Effekt aus.«

AUF EINEN BLICK
ALLERWELTSGETRÄNK MIT UNKLARER WIRKUNG

1 Grüner Tee enthält reichlich so genannte Catechine – Substanzen mit antioxidativen Eigenschaften, die vielfältige Wirkungen auf den Körper haben.

2 In Experimenten mit Zellkulturen und Versuchstieren erwies sich grüner Tee als Krebs hemmend.

3 Klinische Studien mit Menschen dagegen haben widersprüchliche Ergebnisse geliefert – unter anderem vielleicht deshalb, weil sich die Catechine hier nicht so hoch dosieren lassen wie im Tierversuch.

Fehlerhafte Erinnerungen verzerren rückblickende Studien

Unter anderem deshalb kann man den medizinischen Nutzen des Tees für den menschlichen Körper nur außerordentlich schwer belegen. Bei einschlägigen epidemiologischen Untersuchungen handelte es sich zunächst meist um Fall-Kontroll-Studien an ausgewählten Bevölkerungsgruppen, in denen die Vorgeschichte, der Lebensstil und die früheren Erkrankungen von Krebspatienten mit denen von gesunden Personen verglichen wurden. Auf der Grundlage solcher Arbeiten vermuteten Forscher, der Genuss grünen Tees könne einen gewissen Schutz vor Krebs bieten. Doch der Epidemiologe Piet van den Brandt von der niederländischen Universität Maastricht rät zur Vorsicht: »Diese Arbeiten wurden während der 1970er, 1980er und 1990er Jahre durchgeführt, und viele Wissenschaftler äußerten den Verdacht, dass sie durch fehlerhafte Erinnerungen der Teilnehmer oder durch mangelhafte Kriterien der Probandenauswahl verzerrt seien.«

Fall-Kontroll-Studien kranken unter anderem daran, das frühere Verhalten der teilnehmenden Personen zu erfassen und sich dabei auf deren Selbstauskünfte zu stützen, die oft fehlerhaft sind. Außerdem ist die Aussagekraft der Ergebnisse vielfach dadurch beeinträchtigt, dass Probanden ihre Lebensweise stark verändert haben: Wenn etwa Krebspatienten ihre Diagnose erhalten, stellen sie häufig ihre Ernährung um. Daher bevorzugen Epidemiologen wie van den Brandt so genannte Kohortenstudien, die in die Zukunft gerichtet sind. Bei einer solchen Erhebung beobachten die Forscher eine ausgewählte Personengruppe über einen bestimmten Zeitraum hinweg und erfassen deren Lebensweise sowie das Auftreten gewisser Krankheiten, um herauszufinden, ob zwischen beidem ein Zusammenhang besteht. Kohortenstudien haben den Vorteil, dass sie das Krankheitsgeschehen innerhalb einer Bevölkerungsgruppe in einem kommenden Zeitraum (»prospektiv«) erfassen und deshalb nicht von fehlerbehafteten Erinnerungen der Teilnehmer an frühere Lebensgewohnheiten abhängen.

Wider den Krebs

Epigallocatechingallat (EGCG), eine Verbindung mit Krebs hemmenden Eigenschaften, ist in grünem Tee reichlich enthalten. Obwohl Wissenschaftler mehrere mutmaßliche Wirkmechanismen von EGCG kennen, ist unklar, ob das Trinken von Tee bedeutsame Effekte auf die Gesundheit hat.

Krebszelle
ROS
EGCG
Zellkern
neutralisierte ROS
Protein
Mitochondrium

DNA-Schäden
Krebszellen zeichnen sich durch erhöhte Stoffwechselaktivität aus, was unter anderem zur Bildung reaktionsfreudiger Sauerstoffverbindungen (ROS) führt. Diese schädigen die DNA und treiben die Tumorentstehung voran. EGCG hat antioxidative Eigenschaften und könnte DNA-Schäden verhindern, indem es ROS neutralisiert.

Gewebewucherung
Es gibt Hinweise darauf, dass EGCG die Neubildung von Blutgefäßen hemmt. Das könnte zur Folge haben, dass Tumoren nicht ausreichend mit Sauerstoff und Nährstoffen versorgt werden und somit langsamer wachsen.

Zellwachstum und -teilung
EGCG koppelt vermutlich an verschiedene Proteine in oder auf Krebszellen und behindert so deren Wachstum und Teilung. Auch könnte es Signalkaskaden in Gang setzen, die den Untergang dieser Zellen herbeiführen.

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / BUSKE-GRAFIK, NACH EISENSTEIN, M.: TEA FOR TUMOURS. NATURE 566, 2019

Faktoren wie Tabakkonsum, die große gesundheitliche Auswirkungen haben, können epidemiologische Studien stark verfälschen. 1994 legte eine Fall-Kontroll-Studie aus Schanghai die Vermutung nahe, grüner Tee schütze Frauen und Männer unterschiedlich gut vor Speiseröhrenkrebs. Tatsächlich aber trat der Schutzeffekt vor allem deshalb bei Frauen zu Tage, weil nur wenige von ihnen Tabakprodukte konsumierten – während 75 Prozent der untersuchten Männer rauchten. Als die Forscher dies berücksichtigten und lediglich die (relativ kleine) Untergruppe der nichtrauchenden und nichttrinkenden Teilnehmer betrachteten, kamen sie zu dem völlig anderen Ergebnis, dass Teekonsum bei beiden Geschlechtern das Speiseröhrenkrebsrisiko um rund 60 Prozent reduziert.

Trotz solcher Schwierigkeiten haben manche Kohortenstudien eine gewisse Krebs hemmende Wirkung grünen Tees belegt. In einer 2016 publizierten Untersuchung haben Forscher um Junxiu Liu von der University of South Carolina den Gesundheitszustand von mehr als 164 000 chinesischen Männern zwischen 1990 und 2006 verfolgt. Bei jenen Teilnehmern, die regelmäßig grünen Tee tranken, war das Risiko, an Krebs zu sterben, immerhin um 8 bis 21 Prozent vermindert. In Europa wiederum beobachten van den Brandt und seine Kollegen im Rahmen der Netherlands Cohort Study den Gesundheitszustand von 120 000 Männern und Frauen seit dem Jahr 1986. Dabei zeigte sich, dass Männer offenbar umso seltener an Krebserkrankungen beziehungsweise Herz-Kreislauf-Leiden sterben, je mehr Tee sie konsumieren; auch die Gesamtsterblichkeit ist bei den Teetrinkern vermindert. »Dieser Zusammenhang ist allerdings nicht linear«, betont van den Brandt, »es scheint eine optimale Verzehrmenge zu geben.« Demnach tritt der größte gesundheitliche Nutzen bei täglich drei Tassen Tee auf. Interessanterweise war die Sterblichkeit bei jenen Männern am stärksten vermindert, die neben Tee noch Kaffee zu sich nahmen, und zwar in ungefähr gleicher Menge. Das deutet darauf hin, dass auch Kaffeegenuss gesundheitlich von Nutzen sein kann. Bei Tee trinkenden Frauen hingegen stellten van den Brandt und seine Kollegen keine bedeutsamen medizinischen Effekte fest – was der Fall-Kontroll-Studie aus Schanghai widerspricht.

Der größte gesundheitliche Nutzen scheint bei täglich drei Tassen Tee aufzutreten

Mehrere Arbeitsgruppen haben die tumorpräventive Wirkung grünen Tees in klinischen Studien untersucht, in denen EGCG und andere Teebestandteile als therapeutische beziehungsweise vorbeugende Mittel verabreicht wurden. Denn Tee kann man auf ganz unterschiedliche Weise zubereiten, was großen Einfluss auf seine Beschaffenheit und Stärke hat – und damit auf seine Wirkung im Körper. Deshalb arbeiten Mediziner gern mit Extrakten definierter Zusammensetzung, die den Catechingehalt von starkem grünem Tee nachahmen. Diese haben zudem den Vorteil, dass sie sich in Kapselform verabreichen lassen.

Teeextrakte gegen Prostatakrebs?

Viele Studien nahmen die Anwendungssicherheit solcher Extrakte und die Bioverfügbarkeit ihrer Inhaltsstoffe in den Blick. Letzteres ist deshalb von Bedeutung, weil EGCG den Organismus schnell durchläuft. Die orale Einnahme von Grünteeextrakten hat in einigen Studien tatsächlich dazu geführt, dass Prostata- beziehungsweise Darmkrebserkrankungen langsamer fortschritten. Einer solchen Untersuchung zufolge, die Forscher um Saverio Bettuzzi (Universität Parma) 2006 publiziert haben, hindern Grünteeextrakte die Vorstufen von Prostatakrebs daran, weiter zu entarten. Von 30 Patienten, die ein Jahr lang damit behandelt wurden, entwickelte nur einer einen Prostatatumor, während es in der nicht behandelten, ebenfalls 30-köpfigen Kontrollgruppe neun Patienten waren. Das klingt nach einem starken Effekt, allerdings erscheint die Teilnehmerzahl sehr

niedrig. Und in einer weiteren Studie zum gesundheitlichen Nutzen von Teeextrakten, veröffentlicht 2015, konnten Nagi Kumar und ihr Team keine statistisch bedeutsame Vorsorgewirkung gegenüber Prostatakrebs nachweisen.

Die Zusammensetzung von Teeextrakten schwankt nicht so stark wie die des aufgebrühten Getränks, deshalb rufen Erstere besser reproduzierbare Wirkungen hervor. Allerdings bergen sie auch potenzielle Sicherheitsrisiken. Ihre unerwünschten Nebenwirkungen waren in den bisherigen klinischen Studien zwar größtenteils geringfügig, gut in den Griff zu bekommen und mitunter eher dem Koffein zuzuschreiben als den Catechinen. Yang warnt dennoch, dass hohe EGCG-Dosen Lebervergiftungen verursachen könnten. Denn es sei schon länger bekannt, dass Leberprobleme unter anderem bei Menschen auftreten, die aus Tee gewonnene, hoch dosierte Nahrungsergänzungsmittel zu sich nehmen – meist, um Gewicht zu verlieren. »Ich habe noch nie von Lebervergiftungen gehört, die allein auf Teetrinken zurückzuführen waren«, sagt der Forscher, »doch bei Konzentraten in Kapselform sieht die Sache anders aus: Hier gibt es zahlreiche klinische Berichte über toxische Wirkungen.« Europäische Zulassungsbehörden haben kürzlich empfohlen, die Anwendungssicherheit entsprechender Präparate genauer zu untersuchen, was möglicherweise auf eine künftig strengere Regulierung hindeutet.

Das stellt die Forscher vor ein Problem, denn die bisher vorliegenden Studien lassen vermuten, dass der Krebs hemmende Effekt von Tee eher bescheiden ist und eine wirksame Tumorvorsorge deutlich höhere EGCG-Mengen erfordert als jene, die das aufgebrühte Getränk enthält. Mehrere Forschergruppen versuchen, Catechine mit Hilfe von Nanotechnik gezielter wirken zu lassen. Mukhtar und seine Kollegen haben eine entsprechende Methode entwickelt, bei der EGCG in Kapselform im Prostatagewebe abgeladen wird und dort, jedenfalls in vorklinischen Versuchen, das Tumorwachstum hemmt. Laut Motoichi Kurisawa und seinen Kollegen am Institute of Bioengineering and Nanotechnology in Singapur lässt sich EGCG sogar selbst als Trägersubstanz nutzen und transportiert nicht nur Arzneistoffe gegen Krebs durch den Organismus, sondern verstärkt auch ihre Wirkung. Kurisawas Team hat nachgewiesen, dass Nanokomplexe aus EGCG und pharmazeutisch wirksamen Substanzen in Versuchsmäusen gut funktionieren. Das gilt beispielsweise im Hinblick auf die Substanz Sunitinib, die zur Behandlung des Nierenzellkarzinoms zugelassen ist. Kurisawa betont, Sunitinib werde meist in einer Dosis von 40 Milligramm je Kilogramm Körpergewicht verabreicht. »Wenn wir den Arzneistoff jedoch in Form von Nanokomplexen mit EGCG verabreichen, beobachten wir eine sehr starke Hemmung des Tumorwachstums bereits bei fünf Milligramm je Kilo.«

Angesichts der durchwachsenen Evidenz zur klinischen Wirksamkeit von aufgebrühtem Tee rückt das Getränk zunehmend aus dem Fokus der Krebsforschung. Mukhtar berichtet, es sei mittlerweile schwer geworden, Fördermittel für entsprechende Arbeiten zu bekommen. Yang zufolge ist das ein generelles Problem auf dem Feld der chemischen Krebsprävention: Interventionsstudien an Menschen, um entsprechende Effekte zu untersuchen, seien teuer und hätten meist wenig Früchte getragen. Ein berüchtigtes Beispiel hierfür ist die Studie SELECT (Selenium and Vitamin E Cancer Prevention), die 2008 abgebrochen wurde, weil sie – bei Kosten von mehr als 100 Millionen Dollar – keine tumorpräventive Wirkung von Selen beziehungsweise Vitamin E belegte. Auch Kumar bestätigt, dass Naturprodukte und Wirkstoffe zur chemischen Krebsprävention starke Konkurrenz von neuen Behandlungsverfahren wie der Immuntherapie bekommen haben, die inzwischen beeindruckende klinische Effekte zeigen. »In der Schlange an der Fördermittelausgabe stehen wir immer hinter den anderen«, formuliert sie bildhaft. Dies umso mehr, da es kein tragfähiges Geschäftsmodell gebe: Pharmafirmen hätten wenig Antrieb, ein Produkt klinisch zu testen, das billig und überall verfügbar ist.

Dass der Versuch, die Krebs hemmende Wirkung von Tee nachzuweisen, so unklare Ergebnisse geliefert hat, ist sicherlich enttäuschend. Yang betont allerdings, die gesundheitliche Wirkung des Getränks trete auf einem anderen Feld viel deutlicher zu Tage und könne dort ebenfalls das Krebsrisiko langfristig mindern – nämlich auf dem der Gewichtsreduktion. »Wenn Tee das Körpergewicht und damit das Risiko für Herz-Kreislauf-Erkrankungen senkt, verringert er zugleich das Krebsrisiko«, so der Forscher. »Große Kohortenstudien sollten uns hierzu aufschlussreiche Antworten geben können.« ◂

QUELLEN

Chung, J.E. et al.: Self-assembled micellar nanocomplexes comprising green tea catechin derivatives and protein drugs for cancer therapy. Nature Nanotechnology 9, 2014

Liu, J. et al.: Association of green tea consumption with mortality from all-cause, cardiovascular disease and cancer in a Chinese cohort of 165,000 adult men. European Journal of Epidemiology 31, 2016

Shin, C.M.: Green tea extracts for the prevention of metachronous colorectal polyps among patients who underwent endoscopic removal of colorectal adenomas: A randomized clinical trial. Clinical Nutrition 37, 2017

Van den Brandt, P.A.: Coffee or tea? A prospective cohort study on the associations of coffee and tea intake with overall and cause-specific mortality in men versus women. European Journal of Epidemiology 33, 2018

Nature 566, S. S6–S7, 2019



Spektrum PLUS+

Ihre Vorteile als Abonnent

Exklusive Extras und Zusatzangebote für alle Abonnenten von Magazinen des Verlags **Spektrum** der Wissenschaft



VORTRAG

GIBT ES DUNKLE MATERIE WIRKLICH?

DR. SABINE HOSSENFELDER

5. NOVEMBER 2019, BERLIN

IDEAS STUDIO / GETTY IMAGES / ISTOCK

Kostenfreie **Exkursionen** und **Begegnungen**

12. 11. 2019 Redaktionsbesuch **Sterne und Weltraum**, Heidelberg
13. 11. 2019 Leserexkursion zum Forschungszentrum Jülich
10. 2. 2020 Redaktionsbesuch **Spektrum der Wissenschaft**, Heidelberg
8. 5. 2020 Leserexkursion zum Radioteleskop Effelsberg

Eigene **Veranstaltungen** und ausgewählte Veranstaltungen von **Partnern** zum **Vorteilspreis**

1. 11. 2019 **Spektrum** LIVE-Veranstaltung »Die Wissenschaft vom Whisky«, Hamburg
5. 11. 2019 NeuroForum 2019 »Künstliche Intelligenz und Arbeitswelt«, Frankfurt a. M.
5. 11. 2019 Vortrag von Dr. Sabine Hossenfelder »Gibt es Dunkle Materie wirklich?«, Berlin
15.–16. 11. 2019 Stuttgarter Zukunftssymposium »Kollege KI – Arbeit 4.0«, Stuttgart
22. 11. 2019 **Spektrum** LIVE-Veranstaltung »Pasta, Pomodori, Parmigiano: Physik pur«, Frankfurt am Main
27. 11. 2019 DHV-Symposium »Maschinen statt Menschen? Chancen und Grenzen künstlicher Intelligenz aus Sicht der Wissenschaft«, Bonn
28. 11. 2019 **Spektrum** Schreibwerkstatt, Heidelberg
24. 1. 2020 **Spektrum** LIVE-Veranstaltung »Die Wissenschaft vom Whisky«, Offenbach

---

Digitales Produkt zum kostenlosen Download und weitere Vorteile

Download des Monats im November: Spezial Biologie - Medizin - Hirnforschung 1/2019 »Moleküle des Lebens«
Englischkurs von Gymglish: zwei Monate lang kostenlos und unverbindlich testen

---

Leserreisen

Islands faszinierende Geologie im August 2020 mit Mol Reisen
Vorteilspreis auf ausgewählte ornithologische Reisen bei birdingtours
travel-to-nature-Reisen nach **Namibia**, **Peru** oder **Costa Rica** zum Vorteilspreis
Einkaufsgutschein für den **Spektrum Shop** bei Buchung der Chile-, Polarlicht- oder Mexikoreise von Wittmann Travel e.K.

Weitere Informationen und Anmeldung:

Spektrum.de/plus

MATERIALWISSENSCHAFT
ZWEIDIMENSIONALE REVOLUTION

Forscher entdecken immer mehr Stoffe, die nur eine einzige Atomlage dick sind – und oft ungewöhnliche Merkmale aufweisen. Zudem kann man diese Schichten übereinanderlegen. Dadurch entstehen ultradünne Strukturen mit spannenden neuen Eigenschaften.




José J. Baldoví (links) ist Materialwissenschaftler am Max-Planck-Institut für Struktur und Dynamik der Materie (MPSD) in Hamburg. **Ángel Rubio** ist Direktor des Theoriezentrums am MPSD, Forscher am Center for Computational Quantum Physics in New York sowie Professor für Materialphysik an der Universidad del País Vasco in Bilbao.

spektrum.de/artikel/1675652



Wie Legosteine lassen sich zweidimensionale Schichten verschiedener Materialien zu neuartigen Strukturen kombinieren.

AUF EINEN BLICK
SCHICHT UM SCHICHT

1 Je dünner ein Material, desto stärker beeinflusst die Quantenmechanik die Elektronen. Das verleiht ultradünnen Festkörpern außergewöhnliche Eigenschaften.

2 Graphen war das erste Material aus nur einer atomaren Lage. Inzwischen haben Forscher etliche weitere zweidimensionale Stoffe gefunden, die viel versprechend für industrielle Anwendungen erscheinen.

3 Insbesondere lassen sich die Schichten unterschiedlicher Materialien übereinanderstapeln, wodurch Wissenschaftler schon bald Nanostrukturen mit gewünschten Merkmalen herstellen könnten.

Die Aufregung unter Wissenschaftlern war groß, als es den Physikern André K. Geim und Konstantin Novoselov an der University of Manchester 2004 erstmals gelang, mit einer Klebefolie einzelne Graphitschichten zu isolieren. Das war die Geburtsstunde von Graphen, dem ersten zweidimensionalen Material (siehe **Spektrum** März 2019, S. 50). Zwar hatten theoretische Physiker schon lange spekuliert, dass es solche Strukturen geben könnte, doch niemand hätte gedacht, dass sie sich so einfach herstellen lassen. Die ungewöhnlichen Eigenschaften von Graphen brachten Forscher ins Schwärmen: flexibel, leicht und zugleich erstaunlich widerstandsfähig, entpuppte sich der Stoff außerdem als hervorragender Wärme- und Stromleiter. Innerhalb der nächsten Jahre explodierte die Anzahl der Veröffentlichungen zu diesem Thema.

Tatsächlich sind die einzigartigen Merkmale von Graphen vor allem auf seinen zweidimensionalen Charakter zurückzuführen. Und wie Wissenschaftler schnell feststellten, gibt es eine ganze Reihe weiterer zweidimensionaler Materialien, die sich als mindestens genauso interessant erweisen. Inzwischen durchforsten Chemiker, Physiker und Materialwissenschaftler das Periodensystem nach Elementen, um mit ihnen Stoffe mit einer Dicke von einem oder zumindest nur wenigen Atomen herzustellen. Das könnte neuartige Technologien ermöglichen – zweidimensionale Materialien würden dann vielleicht eine ähnliche Revolution einleiten wie Halbleiter Mitte des 20. Jahrhunderts.

Denn die Eigenschaften eines Stoffs hängen stark von seiner Dicke ab. Je geringer sie ist, desto stärker beeinflussen die Gesetze der Quantenmechanik das Verhalten der Elektronen. Das verleiht ultradünnen Materialien ungeahnte Eigenschaften: Ein normaler elektrischer Leiter wie Graphit wird beispielsweise plötzlich zu einem Halbmetall, in dem sich die Elektronen ungewöhnlich schnell bewegen.

Deshalb erforschen Wissenschaftler schon seit mehr als 70 Jahren Festkörper, die aus vielen einzelnen Lagen bestehen, wie Graphit, Bornitrid oder Dichalkogenide. Damals war es ihnen nicht möglich, einzelne Schichten davon zu isolieren. Aber sie fanden einen anderen Weg, um die elektronischen Eigenschaften zweidimensionaler Strukturen zu untersuchen: Sie widmeten sich zweikomponentigen Stoffen, deren Elektronen an der Grenzfläche zwischen zwei Halbleitern gefangen sind, wie es etwa bei Galliumarsenid der Fall ist. Auf diese Weise entdeckte Klaus von Klitzing 1980 zufällig den überaus spannenden Quanten-Hall-Effekt, der ihm fünf Jahre später den Physik-Nobelpreis einbrachte (siehe »Quanten-Hall-Effekt«, links).

Die »zweidimensionale Revolution«, wie sie manche Forscher nennen, ließ jedoch noch zwei Jahrzehnte auf sich warten. Erst nachdem Novoselov und Geim erstmals Graphen isolierten, begannen Wissenschaftler auf der ganzen Welt nach weiteren zweidimensionalen Materialien zu suchen. Mittlerweile können sie sogar einzelne Lagen verschiedener Stoffe wie Legosteine miteinander verbinden, wodurch vielfältige neue Nanostrukturen entstehen. Sie verwenden dabei unterschiedlichste Substanzen: etwa Dichalkogenide, die sich durch ihre halbleitenden, magnetischen und zum Teil sogar supraleitenden Eigenschaften auszeichnen; Isolatoren wie Bornitrid; Metallhalogenide mit ferromagnetischen Eigenschaften sowie zweidimensionale Materialien aus der vierten und fünften Hauptgruppe des Periodensystems, die sich wie Graphen aus einem einzigen Element zusammensetzen.

Bekannte Materialien entpuppen sich als elektronische Hoffnungsträger

Übergangsmetall-Dichalkogenide (englisch: transition metal dichalcogenides, kurz TMDs) erregten schon in den 1960er Jahren das Interesse der Physiker, denn sie weisen spannende elektronische, optische, mechanische und thermische Eigenschaften auf. TMDs sind Verbindungen der Art MX_2, wobei M ein Übergangsmetall (etwa Molybdän oder Wolfram) darstellt und X ein Chalkogen, also ein Element der sechsten Hauptgruppe wie Sauerstoff oder Schwefel. In den letzten Jahren widmeten sich Forscher wieder vermehrt diesen erstaunlichen Stoffen, da sich einzelne Lagen von ihnen gewinnen lassen.

Im Gegensatz zu Graphen sind die TMD-Schichten allerdings nicht vollkommen flach, sondern bestehen aus drei einzelnen Ebenen: In der Mitte sind die Atome des

Quanten-Hall-Effekt

Im Jahr 1980 untersuchte der deutsche Physiker Klaus von Klitzing, wie sich Elektronen in verschiedenen Transistoren bewegen. Dabei kühlte er seine Proben mit flüssigem Helium auf minus 270 Grad Celsius und legte immer wieder starke Magnetfelder an.

Die Transistoren bestanden aus zwei Halbleitern, in denen die für den Stromtransport verantwortlichen Elektronen zwischen beiden Schichten eingeschlossen waren. Dadurch konnten sich die Teilchen nur in einer zweidimensionalen Ebene bewegen. Als von Klitzing eine Spannung an die Probe anlegte und dabei die Stärke des äußeren Magneten variierte, fiel ihm auf, dass der gemessene elektrische Widerstand immer den gleichen Wert hatte.

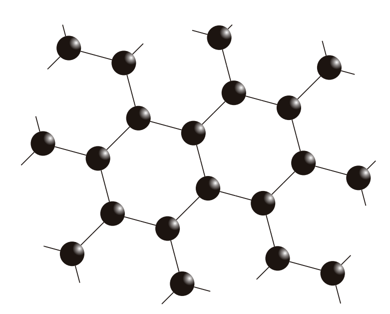
Zu seiner Überraschung verzeichnete der Forscher bei anderen zweikomponentigen Halbleiterstrukturen den gleichen charakteristischen Widerstand. Diese Entdeckung, den Quanten-Hall-Effekt, zogen Wissenschaftler jahrzehntelang heran, um die Einheit Ohm zu definieren. Tatsächlich ist – wie man nun weiß – das ungewöhnliche Phänomen das erste Beispiel für einen bis dahin unbekannten Materiezustand, in dem die Elektronen den abstrakten Gesetzen der Topologie folgen. Erst im letzten Jahrzehnt fanden Forscher heraus, dass dieser seltsame Zustand offenbar keine Seltenheit ist, sondern etliche Materialien unter bestimmten Umständen topologische Eigenschaften besitzen.

Periodensystem zweidimensionaler Materialien

Seit der erstmaligen Isolierung von Graphen können Wissenschaftler inzwischen Dutzende von Materialien herstellen, die aus Schichten mit einer Dicke von einem oder wenigen Atomen bestehen. Das Besondere an diesen zweidimensionalen Strukturen ist, dass sich ihre Elektronen vollkommen anders verhalten als in ihren dreidimensionalen Versionen, wodurch die neuen Stoffe einzigartige Eigenschaften erhalten.

Graphen

Der allotrope Kohlenstoff (grau), der erstmals 2004 isoliert wurde, besteht aus ebenen Schichten mit einer Dicke von einem einzigen Atom. Er zeichnet sich durch seine Stärke, Flexibilität und exotische elektronische Eigenschaften aus.



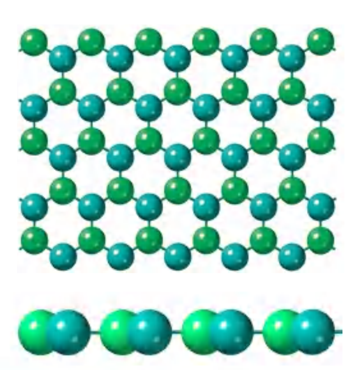
Periodensystem

I	II											III	IV	V	VI	VII	VIII
H																	He
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra	Ac	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Uut	Fl	Uup	Lv	Uus	Uuo

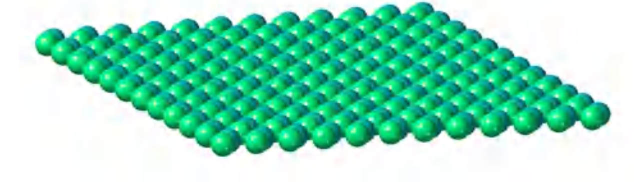
rot: werden aktuell untersucht

Bornitrid

Dieses Material, das aus Stickstoff- (grün) und Boratomen (türkis) besteht, wurde 2010 zum ersten Mal hergestellt. Es ist ein hervorragender thermischer und elektronischer Isolator. Daher nutzen Forscher es meist als Substrat oder Schutzkapsel für Graphen und andere zweidimensionalen Stoffe.

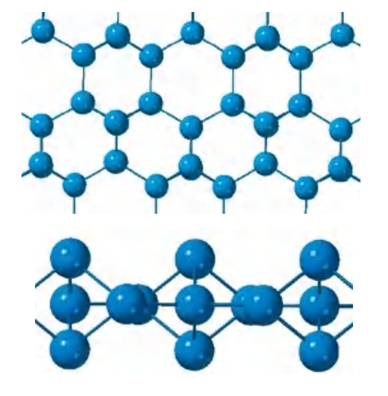






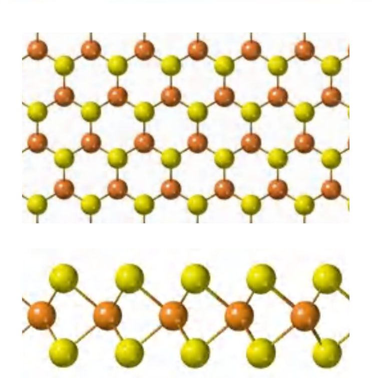
Silicen

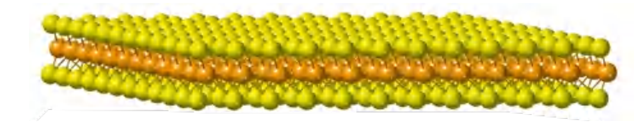
Die Familie der »Xenos« umfasst Materialien, die aus bloß einem Element bestehen, wie Graphen. In der Kohlenstoffgruppe (blau) sticht Silicen, die zweidimensionale Form von Silizium, hervor. Es wurde erstmals 2012 isoliert und besitzt sowohl die exotische elektronische Struktur von Graphen als auch die Halbleitereigenschaften von Silizium.



Dichalkogenide aus Übergangsmetallen

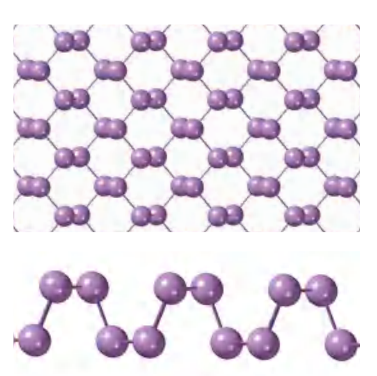
Diese Stoffe bestehen aus einer Schicht mit einem Übergangsmetall (orange), die sich zwischen zwei Chalkogen-Lagen (Elemente der Sauerstoffgruppe, gelb) befindet. 2010 synthetisiert, zeichnen sie sich durch ihre halbleitenden und supraleitenden Eigenschaften aus.

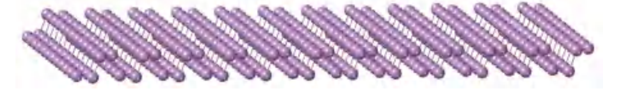




Phosphoren

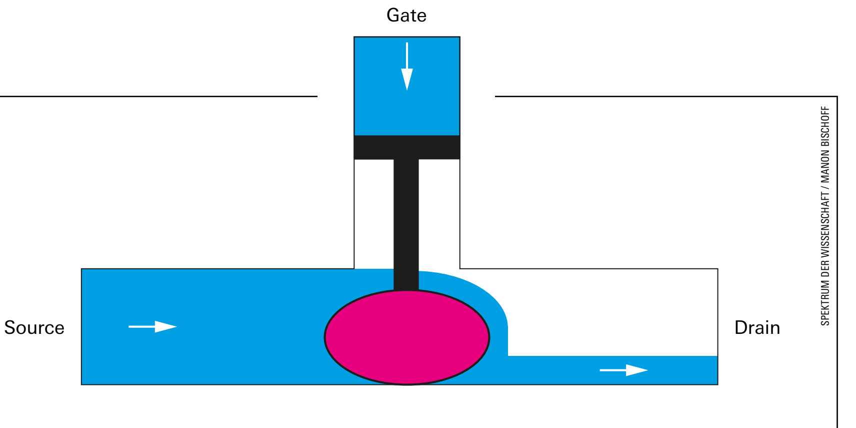
In der Stickstoff-Gruppe (lila) ist Phosphoren, die zweidimensionale Form des Phosphors, eines der am besten untersuchten Xenos. Kurz nach der erstmaligen Herstellung im Jahr 2014 fertigten Forscher einen Transistor aus diesem Material an, da dessen Ladungen extrem mobil sind.





GRAPHEN: MPFIZ (COMMONS.WIKIMEDIA.ORG/WIKI/FILE:GRAPHENLAYER.SVG) / PUBLIC DOMAIN; ÜBRIGE ABBILDUNGEN: JOSÉ J. BALDOVÍ UND ÁNGEL RUBIO

Transistoren



Transistoren sind technische Bauelemente, die aus Halbleitern bestehen. Sie steuern Spannungen sowie Ströme und sind daher ein essenzieller Bestandteil elektronischer Schaltungen, wie sie beispielsweise in Computern vorkommen.

Transistoren funktionieren wie ein umgekehrtes T-förmiges Rohr, in dessen waagerechtem Teil ein dicker Ballon steckt. Wenn man die linke Öffnung (Source) an eine Quelle anschließt, kann das Wasser wegen des Ballons nicht weiterfließen. Durch einen beweglichen Kolben im oberen Eingang (Gate) kann man den Ballon zusammendrücken, indem man Wasser in das Gate bringt. Bei einem elektronischen Transistor fließen die Elektronen durch die Source hinein, und je nach angelegter Spannung am Gate erreicht ein mehr oder weniger abgeschwächter Strom den Drain. Transistoren bestehen aus Halbleitern – üblicherweise nutzt man Silizium –, welche die Arbeit des Ballons übernehmen.

Durch zweidimensionale Halbleiter könnte man die elektronischen Bauteile weiter verkleinern. Darüber hinaus könnten die ultradünnen Schichten Transistoren zu Spitzenleistungen treiben, denn in einigen sind die Elektronen erstaunlich beweglich und schnell, etwa in Graphen. Allerdings ist Graphen kein echter Halbleiter, sondern ähnelt vielmehr einem gewöhnlichen Leiter, so dass es sich nicht als elektronisches Bauteil eignet.

Daher fingen Wissenschaftler an, sich für andere Materialien zu interessieren. Im Halbleiter MoS_2 sind die Elektronen nicht beweglich genug, um einen leistungsfähigen Transistor zu ermöglichen. Doch Andras Kis von der École polytechnique fédérale de Lausanne und seine Kollegen fanden 2011 einen Weg, dieses Problem zu umgehen. Dazu kombinierten sie eine MoS_2-Schicht mit einem Dielektrikum, das die Ladungen der Elektronen abschirmt, wodurch diese sich weniger stark abstoßen und somit beweglicher werden.

2014 und 2015 zogen mehrere Forschungsgruppen nach und entwickelten Transistoren aus Phosphoren und Silicen. Es werden aber voraussichtlich noch einige Jahre vergehen, bis sich diese industriell nutzen lassen.

Übergangsmetalls angesiedelt, darüber und darunter befindet sich je eine Lage Chalkogene. Zwischen den Atomen einer Schicht gibt es starke kovalente Bindungen, die dem Material eine außergewöhnliche Härte verleihen, während es dank seines zweidimensionalen Charakters extrem flexibel bleibt.

Eine einzelne Schicht eines TMDs isolierte erstmals 2010 ein Team um Tony F. Heinz von der Stanford University. Die Forscher verwendeten damals Molybdändisulfid (MoS_2), das sich als um 50 Prozent widerstandsfähiger erwies als Stahl, was es sehr interessant für industrielle Anwendungen macht.

Wissenschaftler wollten daraufhin herausfinden, wie sich die Eigenschaften des TMDs ändern, wenn es immer dünner wird. Dazu entfernten sie mit Klebefolie nach und nach einzelne Schichten eines Molybdändisulfidblocks und untersuchten diesen mit spektroskopischen Mitteln. Die drastischste Änderung ereignete sich ganz am Ende, als sie die vorletzte Schicht entfernten: Plötzlich änderte der Stoff seine elektronischen Eigenschaften. Viele Forscher hoffen daher, künftig zweidimensionales Molybdändisulfid statt wie bisher Silizium in elektronische Bauteile einsetzen zu können, um Mikrochips weiter zu verkleinern. Tatsächlich gelang es Andras Kis von der EPFL Lausanne mit seinen Mitarbeitern 2011, einen Transistor aus einer einzelnen MoS_2-Schicht herzustellen (siehe »Transistoren«, oben).

Zudem ist Molybdändisulfid das einzige bisher bekannte zweidimensionale Material, das Licht emittieren kann. Daher ließe es sich auch in der Optoelektronik verwenden, wo es darum geht, Signale mit Photonen statt mit Elektronen zu übertragen.

Darüber hinaus könnte man einige TMDs als neuartige Informationsträger nutzen. Während man in der gewöhnlichen Elektronik Bits durch Ladungen codiert und in der modernen »Spintronik« dazu den Spin der Teilchen nutzt, verpflanzt man in der »Valleytronik« Informationen in die Leitungseigenschaften eines Materials. Isolatoren leiten zum Beispiel keinen Strom, weil ihre Elektronen eine Barriere – eine so genannte Energielücke – überwinden müssen, um sich frei zu bewegen. In Leitern fehlt hingegen eine solche Lücke. Das Energiespektrum der Elektronen in TMDs enthält charakteristische Täler (englisch: valleys), die sich zum Codieren nutzen lassen. Das würde gegenüber gewöhnlicher Elektronik einige Vorteile bringen: Informationen ließen sich extrem schnell und mit wenig Energieaufwand speichern, und außerdem wären solche Geräte – im Gegensatz zu Datenträgern wie CDs – sehr langlebig. 2016 gelang es unserer Arbeitsgruppe, die Täler in Wolframdiselenid-Proben zu manipulieren, was den ersten Schritt in Richtung Valleytronik ebnete.

Neben ihren spannenden Halbleitereigenschaften haben TMDs noch andere erstaunliche Merkmale. Weil beispiels-

weise einige dreidimensionale Versionen dieser Stoffe wie Niobdiselenid ($NbSe_2$) bei niedrigen Temperaturen supraleitend sind, fragten sich Forscher, ob das bei zweidimensionalen Lagen ebenfalls der Fall ist. Als Miguel Ugeda und Michael Crommie dem 2015 an der University of California in Berkeley nachgingen, stellten sie fest, dass man ultradünne Schichten zwar stärker abkühlen muss, diese dann aber auch zu Supraleitern werden. Dreidimensionales Niobdiselenid leitet unterhalb einer »kritischen« Temperatur von 7,2 Kelvin Strom widerstandsfrei, bei einzelnen Lagen ist das dagegen erst unter 1,9 Kelvin der Fall.

Zwei unabhängige Forschungsgruppen fanden ein Jahr später heraus, dass zweidimensionale $NbSe_2$- und MoS_2-Schichten keine gewöhnlichen Supraleiter sind. Letztere werden nämlich durch äußere Magnetfelder zerstört, während zweidimensionalen TMD-Versionen dann immer noch weiterhin widerstandsfrei Strom leiteten.

Hochtemperatur-Supraleiter

Diese Eigentümlichkeit könnte es erlauben, endlich einem Supraleiter näher zu kommen, der auch bei Raumtemperatur funktioniert. Daher führen wir momentan Experimente durch, in denen wir zweidimensionale TMD-Schichten mit Laserlicht bestrahlen und zusätzlich mit einem Magnetfeld beeinflussen. Dadurch verbinden sich die Elektronen mit Photonen, ohne den supraleitenden Zustand zu zerstören. Wir hoffen so die kritische Temperatur zu erhöhen, unterhalb derer die Stoffe supraleitend werden.

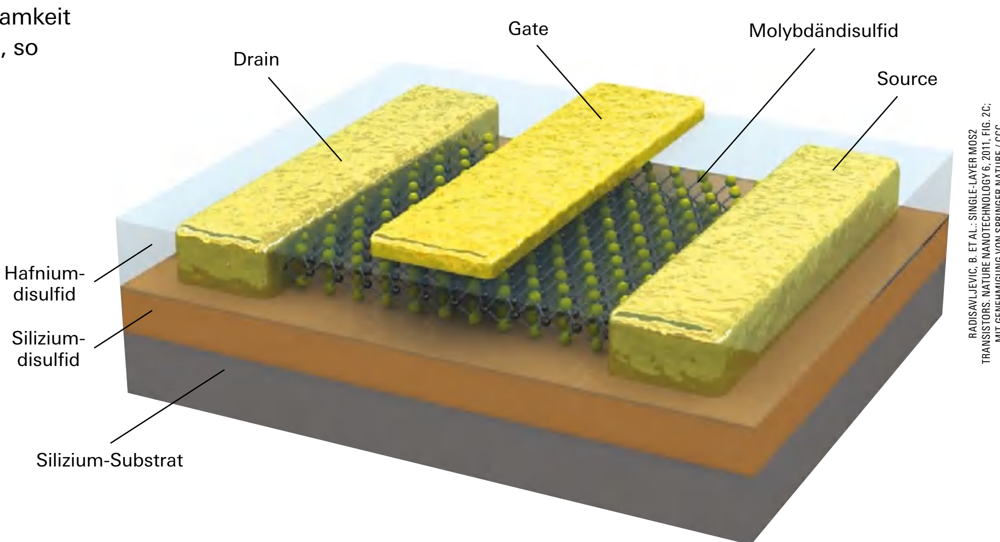
Für die wohl größte Überraschung der letzten Jahre sorgte aber die Arbeitsgruppe um Pablo Jarillo-Herrero vom Massachusetts Institute of Technology (MIT) im April 2018. Als die Forscher zwei Graphenschichten übereinanderstapelten und um 1,1 Grad gegeneinander verdrehten, bemerkten sie, dass das Material supraleitend wurde. Was genau die Elektronen dazu bewegt, Strom unter solchen Umständen widerstandsfrei zu übertragen, ist bisher unklar. Die Forscher versuchen nun das seltsame Phänomen besser zu verstehen und damit weitere Rätsel der Supraleitung zu lösen.

Auch wenn Graphen von allen zweidimensionalen Materialien in den vergangenen Jahren am meisten Aufmerksamkeit erregte, gibt es weitere Stoffe, so genannte Xenos, die einzelne Lagen bilden und aus bloß einem Element X bestehen. Allerdings sind die Xenos im Gegensatz zu Graphen nicht vollkommen flach. Die größeren Bindungsabstände führen dazu, dass sich die Atome zickzackförmig ausrichten.

Einer der interessantesten Vertreter dieser zweidimensionalen Familie ist Silicen, die zweidimensionale Form von Silizium. Gerade für elektronische Technologien könnte der Stoff nützlich sein, denn er kombiniert die exotische Struktur von Graphen mit den hilfreichen Eigenschaften siliziumbasierter Bauelemente. Deshalb erforschen theoretische Physiker bereits seit 1994 die elektronische Struktur von Silicen. Sie sagten damals schon die charakteristische Zickzackanordnung der Atome voraus und prognostizierten, dass das Energiespektrum der Leitungselektronen die Form eines so genannten Dirac-Kegels habe – jener Energieverteilung, die Graphen so einzigartig macht (siehe »Orbitale, Bänder, Kegel«, S. 58).

Erst 2012 gelang es der Gruppe um Noriaki Takagi von der Universität Tokio, die erste zweidimensionale Siliziumschicht zu isolieren. Da Silicen an der Luft instabil ist, brauchten die Forscher ein Substrat, für das sie zuerst Silber und später Iridium verwendeten. Damit konnten sie die elektronische Struktur des Materials bestimmen. Wie unser Team kurz darauf erkannte, hängen diese Eigenschaften jedoch stark von der Wahl des Substrats ab. Dadurch lassen sich Strukturen mit unterschiedlichen Merkmalen fertigen.

2014 stellten wir außerdem fest, dass es nicht nur eine Art von Silicen gibt. Tatsächlich können sich die Atome nicht nur wie bis dahin angenommen zickzackförmig anordnen, sondern auch hantelförmig. Aus dieser Konfiguration lassen sich stabile dreidimensionale Kristalle erzeugen. Solche »Silicite« haben interessante Halbleitereigenschaften und absorbieren Licht im sichtbaren Bereich extrem gut. Somit könnte man sie verwenden, um effizientere Fotovoltaikanlagen herzustellen. Eine Arbeitsgruppe um Alessandro Molle und Deji Akinwande fertigte an der University of Texas in Austin ein Jahr später den ersten Transistor auf



Inzwischen haben Forscher mehrere Transistoren mit Hilfe zweidimensionaler Materialien hergestellt, die effizienter und schneller funktionieren sollen als herkömmliche Versionen.

Silicenbasis an, der – anders als viele andere Bauteile aus neuartigen Materialien – sogar bei Raumtemperatur funktioniert.

Neben Silizium können Xenos auch aus anderen Atomen bestehen. Dazu gehören unter anderem Germanium und Zinn, die Germanen und Stanen bilden. Die Existenz von Germanen hatten Forscher bereits gleichzeitig mit Silicen 1994 vorhergesagt, doch dass Zinn ebenfalls zweidimensionale Strukturen formen könnte, erkannten sie erst 2013.

Theoretischen Physikern zufolge sollten die zwei Xenos bei Raumtemperatur schwächer vibrieren als Silicen, wodurch sie stabiler wären. Experimente ergaben jedoch, dass sich beide Stoffe schnell zu dreidimensionalen Strukturen zusammenrollen, so dass man auch Stanen und Germanen bloß auf Substraten erzeugen kann.

Zusammen mit María Eugenia Dávila vom Instituto de Ciencia de Materiales in Madrid und Guy Le Lay von der Aix-Marseille Université enthüllten wir 2014 erstmals die atomare Struktur von Germanen im Labor, indem wir Germaniumatome verdampften und auf Goldfolie abschieden. Wir erkannten das erwartete hexagonale Muster, in dem sich die Atome anordnen, und konnten ihre Abstände bestimmen. In späteren Arbeiten haben Forscher die hohe Beweglichkeit der Elektronen sowie die von Theoretikern vorhergesagten optischen Eigenschaften bestätigt. Sie fanden außerdem heraus, dass Germanen bei Raumtemperatur ein topologischer Isolator ist: eine exotische Art von Material, dessen Inneres isoliert, während sein Rand extrem gut Strom leitet. Zudem kann Germanen bei niedrigen Temperaturen sogar supraleitend werden. Diese vielfältigen Eigenschaften machen den Stoff zu einem überaus interessanten Versuchsobjekt und könnten spannende Anwendungen eröffnen.

Zeitgleich mit Germanen gelang es uns, Stanen auf einem Bismut-Tellurid-Substrat (Bi_2Te_3) zu erzeugen und dessen atomare Struktur zu bestimmen, die ebenfalls aus hantelförmigen Einheiten besteht. Auch Stanen erwies sich als topologischer Isolator.

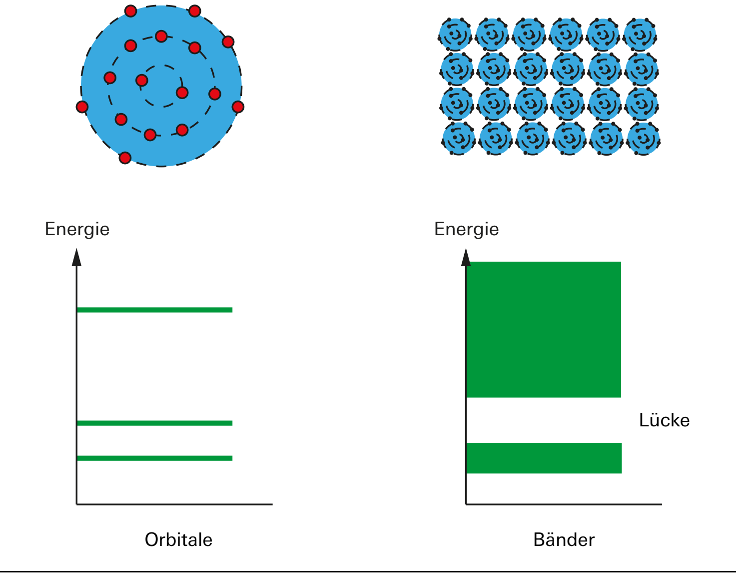
Inzwischen sind Xenos über die Kohlenstoffgruppe (vierte Hauptgruppe im Periodensystem) hinausgewachsen. Eines der vielversprechendsten Materialien ist Phosphoren, eine einzelne Schicht schwarzen Phosphors (das Element

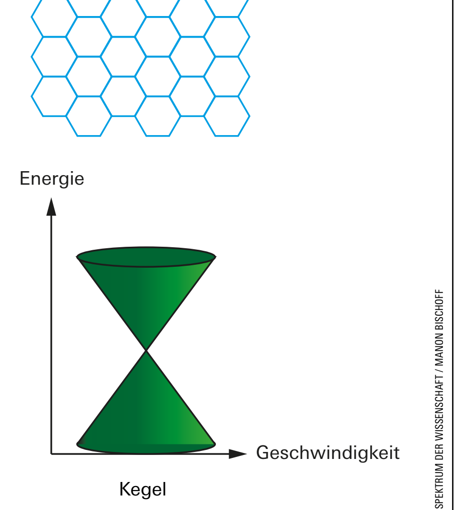
Orbitale, Bänder, Kegel

In einem Atom besetzen die Elektronen einzelne Orbitale mit einem festen Energieniveau (links). Festkörper bestehen aus einer enormen Anzahl von Atomen, wodurch sich die einzelnen Orbitale überlappen. Den Elektronen steht dann ein ganzes »Band« (Mitte) an erlaubten Energien zur Verfügung. Sie können jeden dieser Energiewerte annehmen, solange er nicht schon durch ein identisches Teilchen besetzt ist. Zwischen den einzelnen Bändern existieren häufig Energielücken (so genannte Bandlücken), in denen sich keine Elektronen aufhalten können.

Die genaue Form der Bänder, die von der Geschwindigkeit der Teilchen abhängt, spiegelt die elektronischen Eigenschaften eines Materials wieder. Bei einem Isolator sind beispielsweise alle Bänder – bis auf das Leitungsband – voll besetzt, so dass neue Teilchen keinen Platz darin finden. Sie müssen erst eine große Energielücke überwinden, weshalb ein angelegter Strom nicht durch das Material hindurchfließt.

Besonders markant ist die Bandstruktur von Graphen, welche die Form eines Kegels hat (rechts). Die Elektronen bewegen sich extrem schnell durch die zweidimensionale Schicht. Allerdings weist die Bandstruktur keine Lücke auf; deshalb ist Graphen kein echter Halbleiter, sondern ein so genanntes Halbmetall.





SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / MANON BISCHOFF

gehört der fünften Hauptgruppe an). 2014 isolierten mehrere Gruppen gleichzeitig den Stoff, und schon kurz darauf entwickelten Forscher daraus einen Transistor. Denn Phosphoren besitzt wie Graphen extrem bewegliche Ladungen, während es gleichzeitig ein echter Halbleiter ist. Wegen seiner besonderen optischen Eigenschaften könnte man den Stoff für Fotovoltaikzellen, Infrarot-Nachtsichtkameras und optische Bündel in der Telekommunikation nutzen. Allerdings ist Phosphoren extrem empfindlich, weshalb man erst geeignete Prozesse braucht, um es großflächig herzustellen.

Weißes Graphen als ideales Substrat

Darüber hinaus lassen sich Xenos mit anderen Atomen aus der fünften Hauptgruppe des Periodensystems bilden, wie mit Arsen, Antimon oder Bismut. Forscher widmen sich erst seit Kurzem diesen Stoffen, doch die ersten Ergebnisse erscheinen in elektronischer und optischer Hinsicht viel versprechend.

Außerdem eignen sich einige Elemente der dritten Hauptgruppe, um zweidimensionale Materialien zu bilden. Ein Beispiel dafür ist Borophen, das 2015 isoliert wurde. Wie bei den anderen Xenos sind dessen Atome in einem hexagonalen Gitter angeordnet, allerdings befindet sich bei Borophen in der Mitte jedes Sechsecks ein zusätzliches Atom.

Im Gegensatz zum Ausgangselement Bor, einem extrem schlechten Leiter, transportiert Borophen Strom erstaunlich gut. Möchte man den Stoff industriell nutzen, muss man ihn jedoch mit anderen Materialien beschichten, da er extrem reaktiv ist und schnell oxidiert. Das kann man aber auch als Vorteil nutzen. Denn die Eigenschaften der Stoffe, die als Schutzkapsel dienen, lassen sich durch Borophen gezielt ändern.

Momentan versuchen Forscher zweidimensionale Aluminiumschichten herzustellen, die theoretischen Berechnungen zufolge sogar eine höhere elektrische Leitfähigkeit haben als Graphen oder Borophen. Das Interessanteste scheint noch vor uns zu liegen.

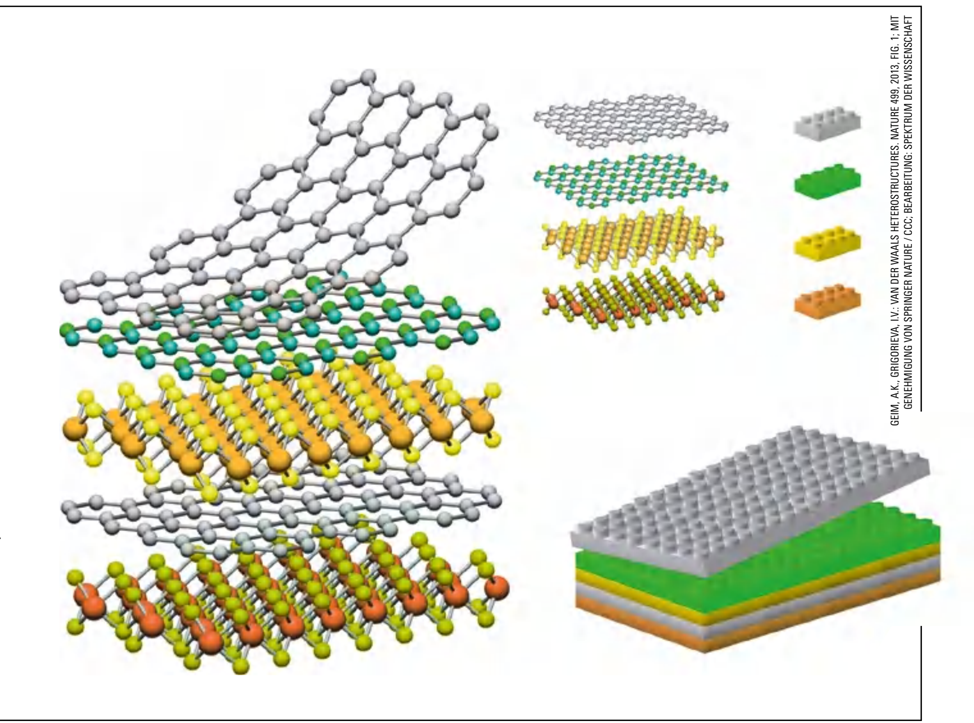
Ein weiterer zweidimensionaler Werkstoff ist Bornitrid (BN), bekannt als »weißes Graphen«. Anders als TMDs, Xenos oder Graphen handelt es sich dabei um einen elektrischen und thermischen Isolator. Deshalb verwenden es viele Wissenschaftler als Substrat oder Schutzkapsel für andere zweidimensionale Strukturen.

Ultradünne Materialien besitzen also vielfältige interessante Eigenschaften. Doch wie kann man das Beste aus ihnen herausholen? Die Antwort scheint einfach: Man kombiniert sie. Forscher hoffen, auf diese Weise künftig Materialien mit speziell entwickelten Eigenschaften herstellen zu können. Die Grundidee besteht darin, eine zweidimensionale Struktur mit verschiedenen Lagen anderer Stoffe zu beschichten, bis sie die gewünschten

Atomares Lego

Zweidimensionale Materialien lassen sich wie Legosteine stapeln, wodurch Strukturen mit frei wählbaren Eigenschaften entstehen. Diese Nanomaterialien heißen wegen der Kräfte, die die einzelnen Schichten zusammenhalten, Van-der-Waals-Heterostrukturen.

Inzwischen stellt dieser Forschungsbereich eines der aktivsten Gebiete der Nanowissenschaften dar. Die Anwendungen reichen von der Elektronik über die Herstellung von Fotovoltaikgeräten bis hin zur Steuerung supraleitender Eigenschaften eines Materials.



GEIM, A.K., GRIGORIEVA, I.V.: VAN DER WAALS HETEROSTRUCTURES. NATURE 499, 2013, FIG. 1; MIT GENEHMIGUNG VON SPRINGER NATURE / CCC; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Merkmale hat. Die relativ schwachen Van-der-Waals-Kräfte wirken dabei als Klebstoff, weshalb Forscher die Konstrukte als Van-der-Waals-Heterostrukturen bezeichnen.

Obwohl wir noch weit davon entfernt sind, perfekte Materialien nach Belieben zu bauen, gibt es seit 2010 erste Fortschritte in diese Richtung. Die meisten Arbeiten konzentrierten sich auf die Verbindung von Graphen mit Bornitrid, wobei Letzteres als Substrat oder Schutzkapsel dient. Der nächste wichtige Schritt erfolgte 2012, als Geim, Novoselov und Leonid Ponomarenko eine Methode aufzeigten, um Schichten aus BN, MoS_2, WSe_2 (Wolframdiselenid) und Graphen zu kombinieren. Bald darauf war es möglich, dutzende unterschiedliche Lagen miteinander zu verbinden. Durch die vielen verfügbaren und noch zu entdeckenden zweidimensionalen Materialien erscheinen die Möglichkeiten unbegrenzt; mit viel versprechenden industriellen Anwendungen. Doch dafür müssen sich solche Heterostrukturen in großem Umfang herstellen lassen, was zu zeigen wäre.

Gestapelte Schichten

Eine weitere Besonderheit der Heterostrukturen ist, dass sie einzelne Moleküle auf ihrer Oberfläche aufnehmen können. In den letzten Jahren untersuchten Wissenschaftler mehrere Situationen, in denen entweder die einzelnen Teilchen die Eigenschaften der Heterostruktur veränderten oder umgekehrt die zweidimensionale Oberfläche die darauf befindlichen Atome oder Moleküle beeinflusste. Zudem lassen sich die Stoffe mit eindimensionalen Systemen wie Kohlenstoffnanoröhren oder dreidimensionalen Halbleitern wie Silizium oder Germanium verbinden. Das hat bereits zu ersten Anwendungen in Logikbausteinen, Photodetektoren und Lichtemittern geführt.

Unsere Arbeitsgruppe wird sich in der nächsten Zeit darauf konzentrieren, verschiedene Moleküle auf der Oberfläche zweidimensionaler Supraleiter anzuordnen. Wir hoffen, deren eigentümliche Eigenschaften nutzen zu können, um beispielsweise Informationen extrem schnell zwischen den Molekülen zu übertragen.

Das Team um Jarillo-Herrero hat bereits etwas Ähnliches untersucht. Die Forscher widmeten sich zweidimensionalen Magneten etwa aus Chromiodid (CrI_3), die sie direkt auf supraleitende TaS_2(Tantaldiselenid)- oder $NbSe_2$-Schichten aufbrachten. Sie möchten künftig einen Nanomagneten herstellen, der als eine Art Schalter dient, um die supraleitenden Eigenschaften eines Materials zu steuern.

Obwohl wir die faszinierende Reise ins Universum zweidimensionaler Materialien gerade erst begonnen haben, konnten wir schon einen Blick auf eine ganz neue Welt erhaschen, die es in den kommenden Jahren zu erforschen gilt. Die sich daraus ergebenden Anwendungen könnten unter anderem zu erheblichen Fortschritten in der Elektronikindustrie führen. ◂

QUELLEN

Balendhran, S. et al.: Elemental analogues of Graphene: Silicene, Germanene, Stanene, and Phosphorene. Nano micro small 11, 2015

Lukacevic, I. et al.: Prospects for experimental realization of two-dimensional aluminium allotropes. Journal of Materials Chemistry C 9, 2019

Novoselov, K.S. et al.: 2D materials and van der Waals heterostructures. Science 353, 2016

Topp, G.E. et al.: Topological floquet engineering of twisted bilayer graphene. ArXiv 1906.12135, 2019

Zhang, Y. et al.: Emergent elemental two-dimensional materials beyond graphene. Journal of Physics D: Applied Physics 50, 2017

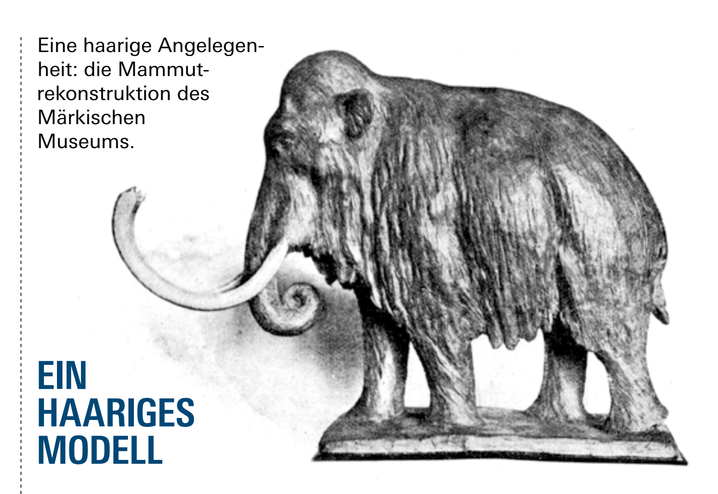
1919

KANADAS RIESENFERNROHR

»Bisher genoß die Volkssternwarte bei Chicago den Ruhm, das größte Fernrohr der Welt zu besitzen. Diesen Ruhm wird sie aber bald an die neue Sternwarte der kanadischen Regierung in Viktoria, Britisch-Kolumbia, abtreten müssen. Das große Spiegelteleskop mißt 72 Zoll Durchmesser. Das Rohr des Teleskops ist 40 Fuß lang und weit genug, um ein Automobil durchzulassen. Sieben Jahre hat es gedauert, bis die Arbeiten beendigt waren.« *Central-Zeitung für Optik und Mechanik 31, S. 335*

POLARLICHTERN AUF DER SPUR

»Was wir über das Nordlicht wissen, ist nicht sehr viel; seine Höhe über der Erde ist erst vor kurzem durch den norwegischen Physiker Birkeland festgestellt worden. Der untere Rand liegt in den meisten Fällen in einer Höhe von etwa 100 km über der Erdoberfläche, unter 85 km Höhe wurde kein Nordlicht festgestellt, die Höhe des oberen Randes ist sehr verschieden, sie reicht bis zu 300 km über der Erdoberfläche.« *Prometheus 1569, S. 64*

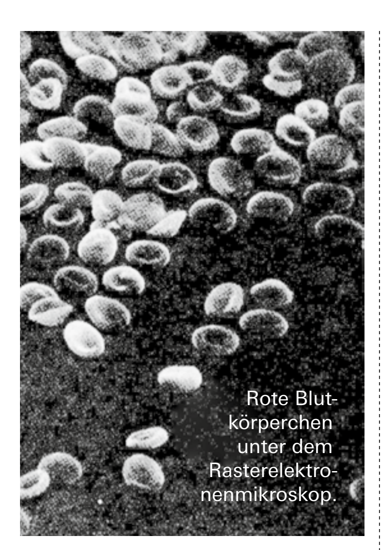


Eine haarige Angelegenheit: die Mammutrekonstruktion des Märkischen Museums.

EIN HAARIGES MODELL

»Da keine der Rekonstruktionen dem Bild entsprach, das ich mir von dem [Mammut] machte, so entschloß ich mich, mich an eine neue Rekonstruktion heranzuwagen. Als Grundlage wurde das Skelett von Borna benutzt. Auf dieses wurden Muskulatur und Haut des indischen Elephanten aufgetragen, nachdem ich habe feststellen können, daß die Muskelansätze übereinstimmten. Für die Behaarung und weitere Details der Körperform war maßgebend, was die sibirischen Mammutleichen, die altsteinzeitlichen Darstellungen und Befunde an fötalen Elephanten gelehrt hatten. Den besten Anhalt aber boten Steinzeitzeichnungen. Das ganze Modell verhält sich zum lebenden Tier etwa wie 1 : 10.« *Die Umschau 45, S. 728–730*

1969



Rote Blutkörperchen unter dem Rasterelektronenmikroskop.

NEUER BLICK AUFS BLUT

»Im Raster-Elektronenmikroskop zeigten sich normale Erythrozyten als bikonkave Scheiben. Beobachtungen ergaben, daß die Membran zahlreiche Vertiefungen besitzt. Im Inneren zeigt sich ein Netzwerk von filamentösem Material. Diese fädigen Elemente sind bei Blutkörperchen von Patienten mit Sichelzellen-Krankheit unregelmäßig gelagert.« *Naturwissenschaftliche Rundschau 11, S. 498*

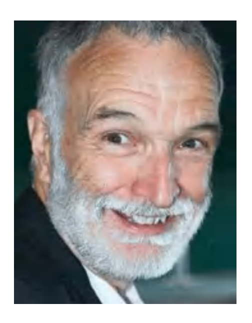
MIT AFFEN SPRECHEN

»Die Gardners nahmen das weibliche, etwa 8 bis 14 Monate alte Schimpansenkind Washoe in ihr Haus auf und bemühten sich, ihm die Taubstummenspreche ›ASL‹ (American Sign Language) beizubringen. Nach 21 Monaten beherrschte die Schimpansin 34 Zeichen, um Gegenstände oder Tätigkeiten zu bezeichnen. Da das Ehepaar auch unter sich in Gegenwart des Versuchstieres die Taubstummensprache benutzte, war Washoe in der Lage, durch Nachahmung zu lernen, daß sich mehrere Zeichen miteinander kombinieren lassen.« *Neuheiten und Erfindungen 23, S. 778*

PASST WIE ANGEGOSSEN

»In einer Mitteilung der Moskauer Akademie der Wissenschaften wird von einem neuen Verfahren berichtet, nach dem sich aus Wolle ein Wollbrei herstellen und in Bahnen giessen lasse. Aus dieser Gusswolle lasse sich jedes beliebige Kleidungsstück zuschneiden, dessen Nähte einfach zusammengeschweisst werden können. Anstatt Wolljacken maschinell zu stricken, sollen sie künftig aus Gusswolle geschweisst werden. In absehbarer Zeit werde das neue Verfahren in der Textilwirtschaft eine entscheidende Rolle spielen.« *Neuheiten und Erfindungen 394, S. 203*

SCHLICHTING!
TIEFER BLICK INS GLAS



Eingeschenkte Flüssigkeiten rufen oft erstaunliche Wahrnehmungstäuschungen hervor – selbst wenn es sich nur um Wasser handelt.

H. Joachim Schlichting war Direktor des Instituts für Didaktik der Physik an der Universität Münster. Seit 2009 schreibt er für **Spektrum** über physikalische Alltagsphänomene.

⏩ spektrum.de/artikel/1675654



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Durch das Glas gesehen erscheint der Schriftzug wesentlich größer.

Der gerade Stecken erscheint im Wasser krumm
Michel de Montaigne (1533–1592)

In einem Glas mit Sprudelwasser macht sich ein Trinkhalm manchmal selbstständig, steigt auf und kippt möglicherweise sogar heraus (siehe »Fällt er oder fällt er nicht?«, **Spektrum** Juli 2009, S. 38). In stillem Wasser hingegen steht er ruhig, und die Situation erscheint vergleichsweise reizlos – doch das ändert sich, sobald man genauer hinsieht.

Berührt der Halm (oder ersatzweise etwa ein Bleistift) beispielsweise mit seinem unteren Ende vorne das Glas und lehnt oben an dessen hinterem Rand, so scheint er innerhalb des Wassers nach hinten und oben hin etwas dicker zu werden (siehe Foto ganz links). Sollte man nicht eigentlich das Gegenteil erwarten? Schließlich sind wir gewohnt, dass sich Dinge, die weiter weg sind, perspektivisch verkleinern. Dreht man das Glas mit den Halm um 180 Grad, ändert sich die Lage, und das untere Ende verbreitert sich. In beiden Fällen wirkt der im Wasser befindliche Abschnitt des Halms umso dicker, je mehr Flüssigkeit sich zwischen ihm und dem Beobachter befindet. Der Effekt überwiegt offenbar deutlich die perspektivische Verjüngung.

Die Vergrößerungswirkung erinnert an das Verhalten einer Sammellinse. Tatsächlich formt das Glas den Flüssigkeitskörper zu einer zylindrischen Linse: Parallel zur Bodenfläche ist es rund, in vertikaler Richtung hingegen nicht gekrümmt. Das Wasser macht es möglich, den Gegenstand sogar innerhalb dieses optischen Elements zu platzieren.





H. JOACHIM SCHLICHTING

Ein am hinteren oberen Glasrand anliegender Trinkhalm scheint innerhalb des Wassers nach oben hin dicker zu werden (links). Lehnt er am vorderen Rand, wirkt er unten breiter (rechts). Ohne Wasser sähe ein Halm durch den Perspektiveneffekt stets umso schmaler aus, je weiter er vom Betrachter entfernt ist.

Der Brennpunkt der Zylinderlinse liegt außerhalb des Glases (siehe Foto unten). Jeder Abschnitt des Halms befindet sich also stets innerhalb der einfachen Brennweite. Darum wirkt das Gefäß in horizontaler Richtung wie eine Lupe, und der Halm erscheint umso breiter, je näher er dem Brennpunkt ist. Der Einfluss des Glasmaterials selbst kann dabei vernachlässigt werden. Zwar ist der Brechungsindex und damit die Vergrößerungswirkung von gekrümmtem Glas größer als die von Wasser, aber für einen deutlichen Effekt ist es einfach zu dünn.

Die scheinbare Verdickung weiter entfernter Bereiche findet sich auch anderswo häufig und tritt dort sogar noch deutlicher hervor – wenn man sie erst einmal bemerkt hat: bei einer Beschriftung außen auf einem Trinkglas oder einer transparenten Flasche. Sie erscheint durch die Flüssigkeit betrachtet viel größer als bei direktem Blick auf der Vorderseite (siehe Foto links oben). Hier trägt der gesamte Wasserkörper zu dem Effekt bei. Man erkennt an dem Schriftzug gut, dass eine Zylinderlinse nur in seitlicher Richtung vergrößert. Die Buchstabenbreite in Längsrichtung bleibt erhalten.

Infolge der Lichtbrechung erscheint ein Gegenstand zudem hinter einer konvexen Grenzfläche umso stärker zu den Seiten verschoben, je weiter die betrachteten Teile vom Zentrum entfernt sind. Das sieht man am besten, wenn man den Trinkhalm quer zur Blickrichtung ins Wasserglas stellt (siehe Foto rechts). Der eingetauchte Abschnitt wird dann links und rechts stärker vergrößert als in der Mitte. Blickt man genau parallel zum Wasserspiegel, erkennt man den verzerrenden Effekt durch einen Versatz direkt über und unter dem Wasser. Eine gedachte Linie, die den oberhalb liegenden Halm unter Wasser verlängert, kreuzt den eingetauchten Teil mitten im Glas.



H. JOACHIM SCHLICHTING

Der Blick von der Seite offenbart einen an der Grenzschicht verschobenen Trinkhalm.



In kohlendioxidhaltigen Getränken wirken Blasen an der Glaswand durch den Linseneffekt ebenfalls viel größer. Für den Vergleich kann man eine am Rand aufsteigende Blasenkette durch vorsichtiges Drehen von allen Seiten untersuchen. Dauerhafter sind solche Luftgebilde in manchen Glaskugeln fixiert, die als Designobjekte erhältlich sind. Je nach Blickrichtung ändern sich die scheinbaren Größen der enthaltenen Blasen. Hier entfällt dann aber ein entscheidender Vorzug der Flüssigkeitslinse: Sie erfrischt den Betrachter nach erfolgter Erkenntnis schluckweise mit ihrem Inhalt.

WISSENSCHAFTS-GESCHICHTE
ZWISCHEN DEN SYSTEMEN

Sowohl unter dem NS-Regime als auch in der DDR gehörte der Physikochemiker Peter Adolf Thiessen (1899–1990) zu den einflussreichsten Wissenschaftsstrategen. Wie konnte er sich so geschickt an die wechselnden Verhältnisse anpassen?





Dieter Hoffmann (links) studierte Physik an der Humboldt-Universität zu Berlin, **Hubert Laitko** studierte an der Karl-Marx-Universität Leipzig Philosophie. Beide promovierten und habilitierten sich in Wissenschaftsgeschichte beziehungsweise Wissenschaftsphilosophie und sind Autoren zahlreicher Veröffentlichungen auf diesen Gebieten.

⏩ spektrum.de/artikel/1675656

Nach dem Ende des Zweiten Weltkriegs mussten sich zahlreiche deutsche Forscher, die unter der Nazidiktatur gearbeitet hatten, den neuen Systemen anpassen. Einem gelang das besonders erfolgreich: dem Physikochemiker Peter Adolf Thiessen (1899–1990). Er war von 1937 bis 1945 Leiter der Fachsparte Chemie im Reichsforschungsrat des »Dritten Reichs« sowie von 1957 bis zu seinem Eintritt in den Ruhestand 1965 Vorsitzender des Forschungsrats der DDR. Die Kombination so einflussreicher Positionen in ein und demselben Lebenslauf erscheint paradox, basierte doch das historische Selbstverständnis der DDR auf entschiedener Gegnerschaft zum NS-Regime. Wie war Thiessens Karriere möglich?

Wissenschaftler benötigen dazu eine »Währung«, die bei den Exponenten der jeweiligen Systeme etwas gilt. Die solideste sind Fachkompetenz und Präsenz an der Forschungsfront, verbunden mit Organisationstalent und politischer Anpassungsfähigkeit. Diese Ausstattung verliert bei politischen Wechseln nicht ihren Wert – zumal in einer Epoche, in der Wirtschaft, Rüstung und damit Macht zunehmend von der Wissenschaft abhängen.

Das konnte Thiessen bieten. Er blieb zeitlebens ein produktiver Forscher. Das ergab sich bei ihm nicht einfach unter dem Zwang der Verhältnisse, sondern war wohl eine Grundhaltung. Selbst wenn er wissenschaftspolitische Spitzenpositionen einnahm und sich ganz auf die Administration hätte zurückziehen können, legte er Wert darauf, gleichzeitig auch Forschungseinheiten zu leiten und in diesen selbst tätig zu sein. Andere, deren einziger Karrieretreibstoff politische Bekenntnisse waren, standen mit leeren Händen da, sobald das System, dem sie gedient hatten, am Ende war.

Unmittelbar nach dem Ersten Weltkrieg nahm der im schlesischen Schweidnitz (heute Swidnica, Polen) geborene Thiessen ein Chemiestudium auf. Es führte ihn von Breslau über Freiburg nach Greifswald. Dort begeisterte ihn Adolf Sieverts für die physikalische Chemie, wies ihn auf das aussichtsreiche Feld der Kolloidchemie hin (Kolloide sind in einem Medium fein verteilte, kleinste Teilchen einer bestimmten Substanz) und empfahl ihn an dessen führenden Vertreter Richard Zsigmondy. Dieser leitete an der Universität Göttingen das anorganisch-chemische Institut. 1923 promovierte Thiessen bei Zsigmondy und nahm unverzüglich die Arbeit an seiner Habilitationsschrift auf, die er 1926 abschloss. Das Habilitationsthema – Kristallisationskeime in hoch übersättigten Metalllösungen – brachte ihn in engen Kontakt mit einer weiteren Koryphäe der physikochemischen Mikrostrukturforschung: Gustav Tammann, Direktor des Göttinger Universitätsinstituts für physikalische Chemie. Tammann hatte sich als Begründer der Metallkunde und als einer der Pioniere der modernen Materialforschung einen Namen gemacht.

In diesen prägenden Phasen seiner Laufbahn konzentrierte sich Thiessen auf eine Art der Forschung, die er lebenslang weiterführte: die technisch hochgerüstete Feinstrukturanalyse von Stoffen aller Art – von dispersen Systemen bis zu kompakten Festkörpern, von anorganischen sowie organischen Substanzen. Dabei war Thiessen überzeugt, Physikochemiker müssten eigene Geräte und Methoden entwickeln, um die Grenzen des jeweils experimentell Möglichen weiter hinauszuschieben. Seine beiden wichtigsten Lehrer waren ihm hier Vorbilder. Zsigmondy erhielt für die Untersuchungen mit seinem »Ultramikroskop« 1925 den Nobelpreis, Tammann konstruierte einen Schmelzofen, mit dem Temperaturen bis zu 3000 Grad Celsius möglich waren. Thiessen selbst wiederum entwickelte beispielsweise 1937 zusammen mit seinem Schüler Theodor Schoon ein Elektronen-Beugungsgerät.

Während der NS-Diktatur war Peter Adolf Thiessen Leiter der Fachsparte Chemie im Reichsforschungsrat. In der DDR wurde er Vorsitzender des Forschungsrats.

AUF EINEN BLICK
DIENER VIELER HERREN

1 Eine Karriere als einflussreicher Wissenschaftsadministrator zunächst in der Nazizeit und später in der DDR mag angesichts der grundverschiedenen Systeme überraschen.

2 Ein solches Muster kam in den Laufbahnen damaliger Forscher jedoch öfter vor, allerdings nur selten so ausgeprägt wie bei Thiessen. Er verstand es hervorragend, die Potenziale politischer Systeme für sich zu nutzen.

3 Thiessen war zugleich in der Wissenschaftsorganisation und in der Forschung aktiv und vermittelte politisch zwischen beiden Gebieten. Erst in seinen letzten Lebensjahrzehnten schwand sein Einfluss.

Die Suche nach Anwendungen sollte nicht auf Kosten fundamentaler Erkenntnisse gehen

Im Lauf der Zeit widmete er sich zunehmend Phänomenen an Oberflächen. Zu seinem Spezialgebiet wurde die Tribochemie. Sie befasst sich mit den Vorgängen, die ausgelöst werden, wenn mechanische Energie auf die Grenzflächen von Festkörpern einwirkt. Für Thiessen bildete die physikalische Chemie das Fundament für die Gesamtheit der chemischen Wissenschaften. Er maß der Grundlagenforschung erhebliches Gewicht bei. Zwischen ihr und der Anwendungsforschung gab es für ihn aber keinen Gegensatz und insbesondere kein Wertgefälle.

Das entsprach dem geistigen Klima, das im Wissenschaftsbiotop Göttingen prägend geworden war, spätestens mit dem Erfolg der von Felix Klein 1898 ins Leben gerufenen Göttinger Vereinigung zur Förderung der angewandten Physik. Demnach stehen die Vertiefung der Erkenntnis auf der einen Seite und die Erweiterung des Anwendungsspektrums auf der anderen Seite einander nicht im Weg, sondern bedingen sich gegenseitig. Später sollte Thiessen wiederholt intervenieren, wenn leichtfertige Forderungen nach Anwendungen der Grundlagenforschung

Mit seinem Bekenntnis zum Nationalsozialismus wurde Thiessen für die NS-Wissenschaftspolitik interessant

die Luft zum Atmen zu nehmen drohten, wie es sowohl im Dritten Reich als auch in der DDR vorkam.

Thiessens Lebensabschnitt in Göttingen endete abrupt. Er hatte gehofft, Nachfolger Zsigmondys zu werden. Der schwer erkrankte Gelehrte hatte seinem Schüler bald nach dessen Promotion einen zunehmend größeren Teil der Institutsarbeit überantwortet. Nach Zsigmondys Tod 1929 leitete Thiessen das Institut de facto, ab 1931 auch de jure, nunmehr als außerplanmäßiger Professor und kommissarischer Direktor. Im Januar 1933 wurde jedoch überraschend der Physikochemiker Hans von Wartenberg auf den vakanten Lehrstuhl berufen. Thiessens fast ein Jahrzehnt lang gehegte Karrierehoffnungen schienen durchkreuzt.

In dieser Situation kamen Thiessen die politischen Entwicklungen zu Hilfe. In Göttingen hatte die aufkommende nationalsozialistische Bewegung Studenten und junge Wissenschaftler schon früh angezogen. Thiessen trat bereits 1922 der NSDAP bei. Er hatte die Mitgliedsnummer 3096 und war alles andere als ein passives Parteimitglied. Beispielsweise stellte er im Auftrag der Göttinger SA-Führung in Northeim und Heiligenstadt die ersten SA-Scharen auf. 1928 (nach anderen Quellen schon 1926) verließ er die NSDAP wieder, um seine Hochschulkarriere nicht zu gefährden. Im April 1933 trat er erneut ein und wurde zugleich förderndes Mitglied der SS. Während der Naziherrschaft und danach war sein Verhalten in politischen Angelegenheiten allerdings eher rational kalkuliert als ideologisch geprägt.

Mit der nationalsozialistischen Machtübernahme etablierte das Regime seine eigene Wissenschaftspolitik. Dabei spielte das 1934 aus dem Preußischen Kultusministerium hervorgegangene Reichserziehungsministerium (REM), das nunmehr für das gesamte Reichsgebiet zuständig war, eine zentrale Rolle. Mit seinem erneuerten Bekenntnis zum Nationalsozialismus wurde Thiessen für die NS-Wissenschaftspolitik in zweifacher Hinsicht interessant: als Kandidat für verantwortliche Positionen im Forschungsbetrieb selbst sowie für die Übernahme wissenschaftspolitischer Beratungs- und Leitungsfunktionen. Im folgenden Jahrzehnt seiner Laufbahn waren die beiden Aspekte durchgehend miteinander verwoben.

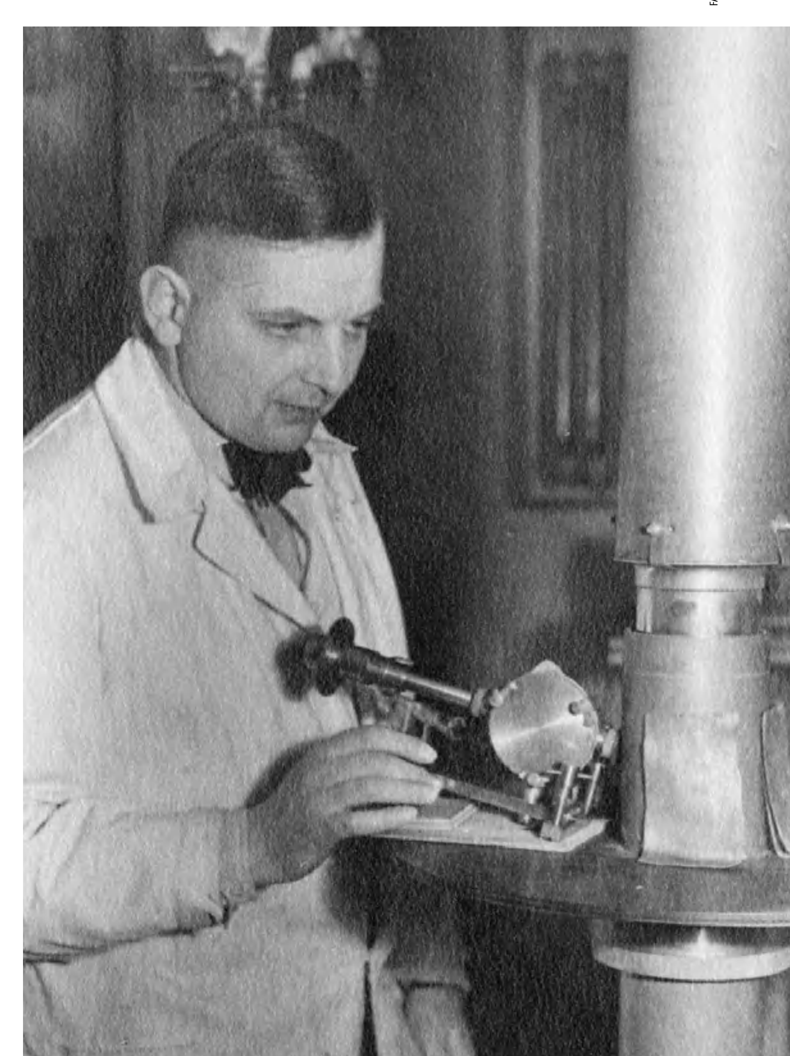
Beim Übergang in Thiessens neue Lebensphase spielten zwei Chemiker und bekennende Nationalsozialisten aus seinem Göttinger Umfeld eine vermittelnde Rolle. Das war erstens Gerhart Jander, Abteilungsvorsteher am Universitätsinstitut für Allgemeine Chemie, der ihn bereits bei seinem Wechsel von Greifswald nach Göttingen unterstützt hatte. Jander war Abteilungsvorsteher am Institut für Allgemeine Chemie. Zweitens fungierte dessen Assistent Rudolf Mentzel seit 1930 als Kreisleiter der NSDAP für Göttingen. Zu dem fast gleichaltrigen Mentzel entwickelte Thiessen anfangs sogar freundschaftliche Beziehungen.

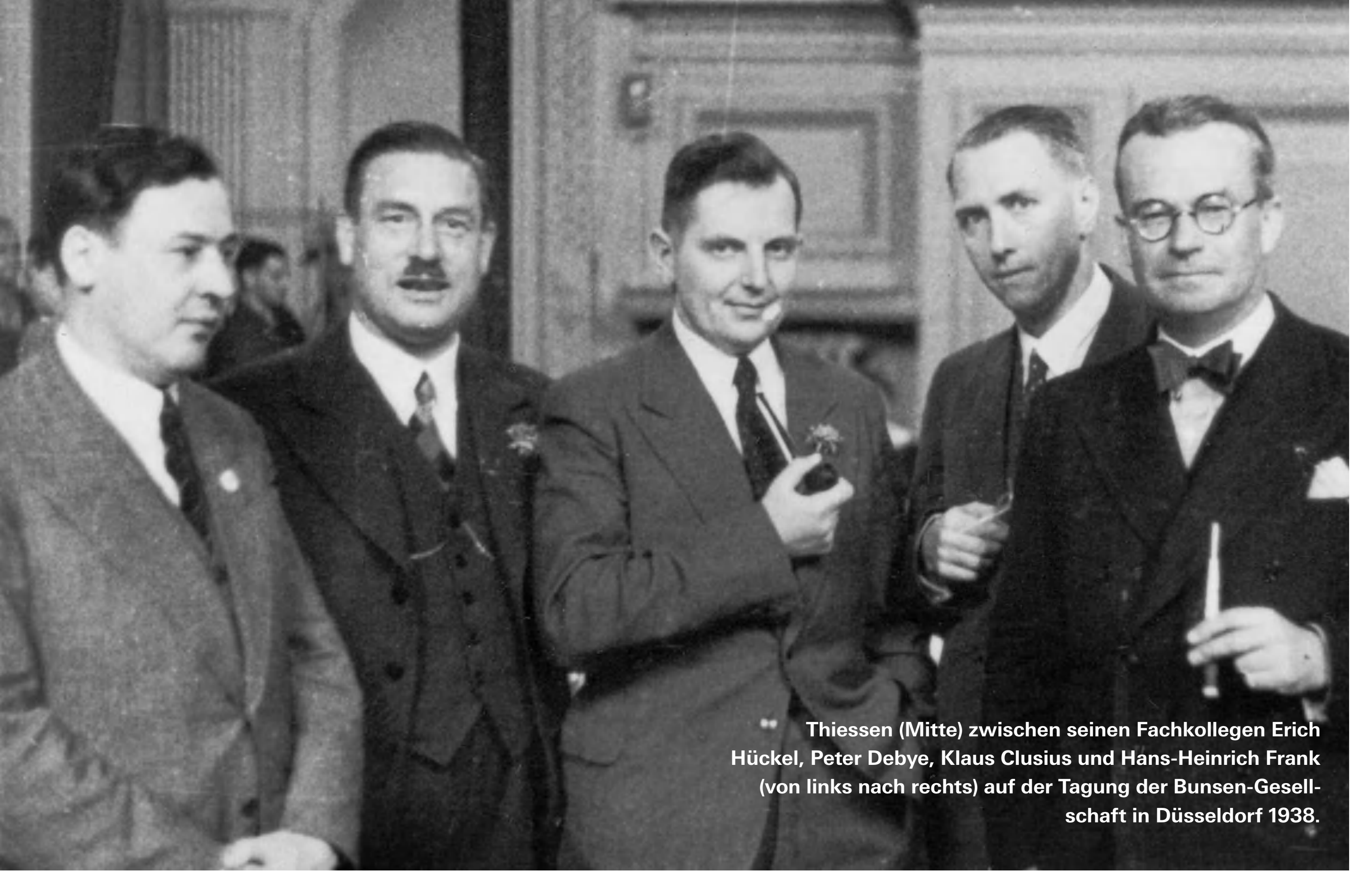
Das neue Regime verfolgte zunächst den Plan, das Kaiser-Wilhelm-Institut (KWI) für physikalische Chemie und Elektrochemie in Berlin-Dahlem in ein Forschungszentrum für chemische Kampfstoffe umzuwandeln. Auf der Grundlage des im April 1933 verabschiedeten Gesetzes zur Wiederherstellung des Berufsbeamtentums wurden viele Mitarbeiter des Instituts vertrieben, darunter auch der Gründungsdirektor und Nobelpreisträger Fritz Haber. Als Habers Nachfolger wurde Jander eingesetzt, der schon in Göttingen zusammen mit Mentzel an geheimen Militärforschungen, darunter auch an der Entwicklung von chemischen Kampfstoffen beteiligt gewesen war. Mentzel und Thiessen wurden ebenfalls nach Dahlem geholt und Abteilungsvorsteher unter Jander. Im Oktober 1933 übernahm Thiessen die Abteilung für physikalische Chemie. Das politische Management gewann damit für die Besetzung einer sensiblen Position einen kompetenten und zugleich politisch verlässlichen Fachmann, und hier konnte Thiessen auf eine weitere Karriere hoffen.

Der Stern seines Vorgesetzten Jander verlosch allerdings sehr schnell: Einerseits entwickelte er nicht jenes wissen-

Nicht nur in der Anfangsphase seiner Karriere war Thiessen – wie hier in den 1930er Jahren – ein produktiver Forscher; bis zum Lebensende maß er der Arbeit im Labor großen Wert bei.

FAMILIEN-ARCHIV THIESSEN; MIT FRDL. GEN. VON DIETER HOFFMANN





Thiessen (Mitte) zwischen seinen Fachkollegen Erich Hückel, Peter Debye, Klaus Clusius und Hans-Heinrich Frank (von links nach rechts) auf der Tagung der Bunsen-Gesellschaft in Düsseldorf 1938.

schaftliche Format, das von einem KWI-Direktor auch unter NS-Verhältnissen erwartet wurde; andererseits sollte die Giftgasentwicklung nun, anders als zunächst beabsichtigt, außerhalb der Kaiser-Wilhelm-Gesellschaft (KWG) unter direkter Regie des Militärs erfolgen. Im Frühjahr 1935 wurde Jander schließlich auf einen Lehrstuhl an der Universität Greifswald abgeschoben. Nun war für Thiessen der Weg an die Spitze des Instituts frei. Er selbst hatte sich inzwischen – wohl auch unter Ausnutzung seiner politischen Positionen – intensiv darum bemüht, die akademische Weihe eines Ordinarius zu erhalten, und war damals für Professuren in Frankfurt am Main, Freiburg und Münster im Gespräch. Im Frühjahr 1935 erhielt er schließlich einen Ruf an die Universität Münster, trat aber die Professur nicht mehr an, da er zum 20. Mai 1935 (kommissarisch bereits ab 1. April) als Kandidat des Erziehungsministeriums zum Direktor des KWI berufen wurde.

Hochschulwesen im Sinn der NS-Ideologie

Thiessens erste im engeren Sinn wissenschaftspolitische Funktion war der Posten eines nebenamtlichen Referenten für die »fachwissenschaftliche Beratung auf dem Gebiet des Hochschulwesens« im Amt Wissenschaft des REM. Er war hier vom Sommer 1934 bis zum Frühjahr 1937 tätig und vor allem mit Personalien befasst. Dabei knüpfte er zahlreiche Kontakte und erwarb ein umfangreiches Insiderwissen, mit dem er in den unübersichtlichen Strukturen der NS-Wissenschaftslenkung navigieren konnte. Außerdem war er in die Novellierung des Hochschulrechts einbezogen und trug so maßgeblich zur nationalsozialistischen Umgestaltung des deutschen Hochschulwesens bei. Beispielsweise beteiligte er sich federführend an der Ausarbeitung einer Habilitationsordnung von 1934, die eine Hochschulkarriere von außerwissenschaftlichen Kriterien abhängig machte. Für die Erteilung der Lehrberechtigung wurde etwa der so genannte Ariernachweis nötig, und für den künftigen Hochschullehrer galt ein Verbot der Ehe mit einem »Nichtarier«. Weiterhin wurde die Teilnahme an Wehrsportlagern und politischen Schulungen sowie ein rückhaltloses Eintreten für den NS-Staat und seine Weltanschauung verlangt. Darüber hinaus hatten die Habilitationskommissionen das »Führer-Format« des Kandidaten einzuschätzen und Voten der NS-Dozentenschaft und des Reichserziehungsministeriums zu berücksichtigen.

Neben der neuen Habilitationsordnung trug auch das Gesetz zum »Verbot der Promotion von Nichtariern« die Handschrift von Thiessen. Er brachte zudem die »Richtlinien zur Vereinheitlichung der Hochschulverwaltung« mit auf den Weg und war nicht zuletzt für die Berufung und Entpflichtung von Hochschullehrern verantwortlich. Thiessen hat so maßgeblich an der Umsetzung der antisemitischen Diskriminierungs- und Verfolgungspolitik der Nazis im Hochschulbereich mitgewirkt und diese legislativ abgesichert.

Obwohl die Spitze der KWG lieber den Münchener Nobelpreisträger Hans Fischer in der Nachfolge Janders gesehen hätte, oktroyierte Reichserziehungsminister Bernhard Rust der KWG Thiessen als neuen Institutsdirektor. Dieser Schritt erfolgte gegen den Willen der KWG, doch in den folgenden Jahren gelang es Thiessen, sich in diesem Milieu durchzusetzen und Anerkennung zu finden. Zum einen war er den in der KWG tonangebenden Kreisen intellektuell gewachsen. Zum anderen verschaffte er dem Institut nach seiner Quasiauflösung infolge der antisemiti-



ARCHIV BBAW, ABTEILUNG SAMMLUNGEN, FOTOSAMMLUNG, PETER ADOLF THIESSEN, NR. 93

Enges Verhältnis zur Macht: Thiessen (rechts) mit Lotte und Walter Ulbricht während eines Besuchs in der Sowjetunion 1959.

schen Vertreibungspolitik der NSDAP wieder wissenschaftliches Ansehen, auch wenn es nicht an das Niveau der Haber-Ära heranreichte. Unter seiner Leitung wurde das KWI thematisch neu und breit aufgestellt, mit talentierten Fachleuten besetzt und hervorragend ausgestattet. Im Dritten Reich gab es nicht viele Forschungsinstitute, die unter vergleichbar großzügigen Verhältnissen arbeiten konnten. Konzeptionell, methodisch und technisch war es offen für eine Vielzahl ziviler, aber auch militärischer Anwendungen, darunter zahlreiche Forschungsvorhaben, die auf das kriegsvorbereitende Autarkieprogramm ausgerichtet waren.

Thiessen wurden die üblichen Signaturen der Zugehörigkeit zur Elite der KWG umstandslos zuteil. Beispielsweise wurde er aufgefordert, den Festvortrag zur Hauptversammlung 1938 zu halten, und 1939 wurde er unter anderem auf Vorschlag von Otto Hahn zum Ordentlichen Mitglied der Preußischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin gewählt.

Eine Möglichkeit, auch in den höheren Etagen der Forschungslenkung Verpflichtungen zu übernehmen, ergab sich für Thiessen, als die NS-Führung im Spätsommer 1936 verkündete, Wirtschaft und Militär sollten innerhalb von vier Jahren zur Kriegsführung fähig werden. Vom REM her wurde auf dieser Grundlage, wahrscheinlich unter wesentlicher Teilnahme Thiessens, ein Reichsforschungsrat (RFR) konzipiert. Dieser sollte alle für die Kriegsvorbereitung erforderlichen Forschungen im Rahmen des gesamten Reichs lenken, koordinieren und finanzieren. Er nahm im März 1937 seine Tätigkeit auf. Mentzel wurde Leiter der Geschäftsführung des RFR; sie war am Berliner Sitz der Deutschen Forschungsgemeinschaft DFG untergebracht, als deren Präsident dieser seit Ende 1936 fungierte. Thiessen übertrug man die Leitung der Fachsparte Chemie. Sie war besonders für die Politik der Autarkie von zentraler Bedeutung, schließlich sollten synthetische Ersatzstoffe devisenintensive Importware ablösen. Entsprechend verfügte die Sparte über üppige Forschungsgelder, die zu rund einem Drittel in Thiessens eigenes Institut flossen.

Strategien für eine Zeit nach dem Krieg

Seine Rolle in der NS-Forschungspolitik, die prestigeträchtige Leitung des KWI und die Vielzahl anderer Positionen machten Thiessen zu einem der einflussreichsten und mächtigsten Wissenschaftler und Wissenschaftsstrategen des NS-Staats. Sein affirmatives Verhältnis zu Hitlerdeutschland ging allerdings nicht so weit, dass er die bevorstehende Niederlage nicht bemerkt und sich darauf eingestellt hätte. So gibt es Indizien, dass er gegen Kriegsende von der Existenz einer kommunistisch orientierten Widerstandszelle an seinem Institut wusste und sie duldete.

Der Pragmatiker Thiessen dürfte im Voraus erwogen haben, wie er seine Arbeit später fortsetzen könnte. In der angelsächsischen Welt, wo viele deutsche Emigranten lebten, wäre das kaum möglich gewesen: Er gehörte zu den NS-Vorzeigewissenschaftlern und hatte von der Vertreibung jüdischer Wissenschaftler aus dem Haberschen Institut immens profitiert. Im zerstörten Deutschland selbst waren allein schon die materiellen Voraussetzungen für die

Fortsetzung international konkurrenzfähiger Forschung denkbar ungünstig.

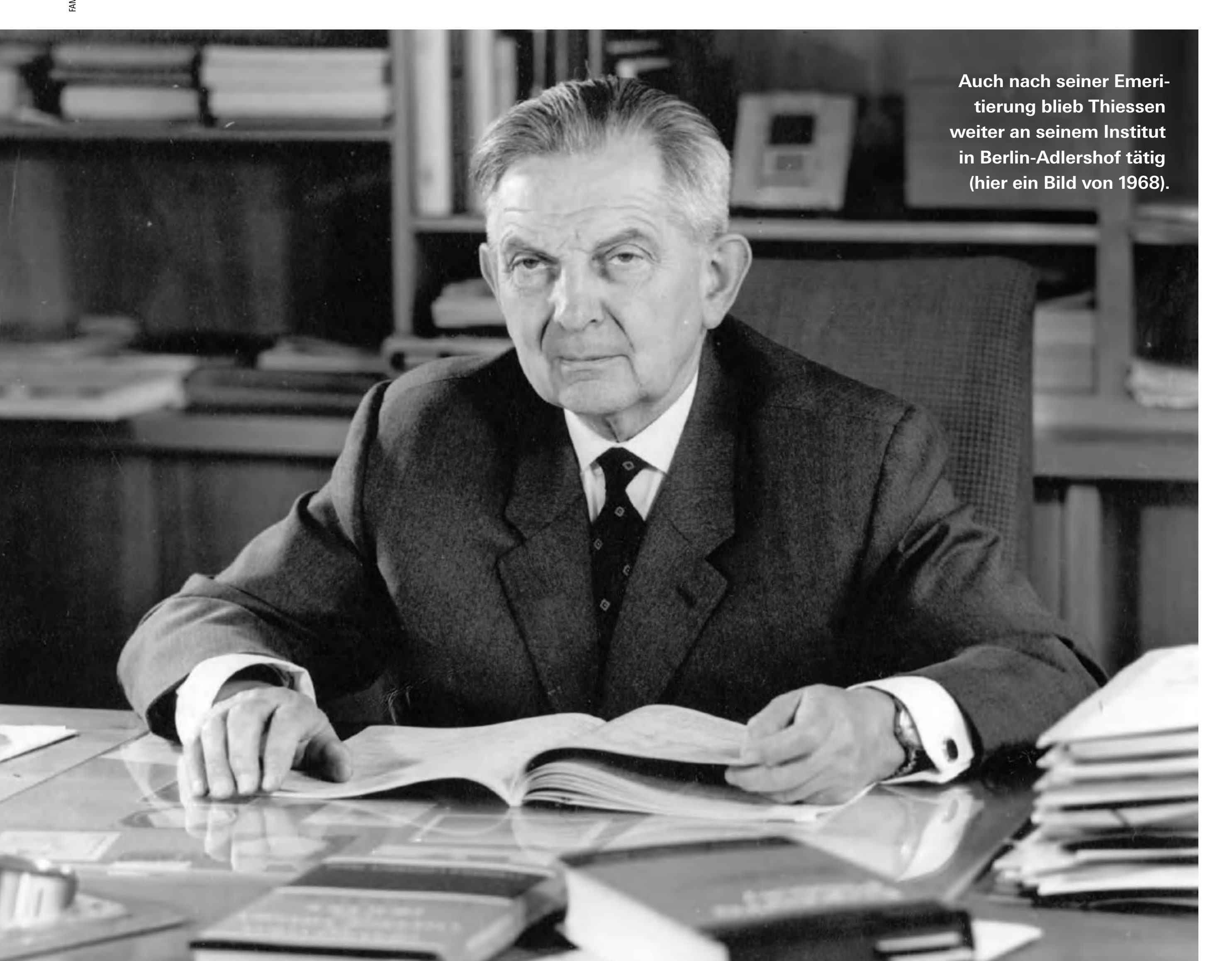
Das alles sprach für die Sowjetunion als Ultima Ratio. Diese Möglichkeit wurde in dem Maß real, wie es mit dem Fortgang des Kriegs immer wahrscheinlicher wurde, dass Berlin von sowjetischen Truppen eingenommen werden würde. Ein technisch gut ausgestattetes Forschungsinstitut musste der in Trümmern liegenden Sowjetunion hochwillkommen sein. Wenn Thiessen es gewissermaßen in ihre Hände legen könnte, würden sich für ihn selbst und seine Mitarbeiter am ehesten Chancen für einen Neustart ergeben – so etwa mag er kalkuliert haben. Jedenfalls hat er sein Institut bis zum Kriegsende nicht nur arbeitsfähig gehalten, sondern auch alle Aufforderungen unterlaufen, es nach West- oder Süddeutschland zu verlagern wie die meisten anderen Dahlemer Institute.

Als Dahlem Ende April 1945 durch die Rote Armee befreit wurde, konnte Thiessen der Besatzungsmacht ein intaktes Institut übergeben. Sowjetische Kommissionen inspizierten es umgehend und stellten es unter den Schutz der Besatzungsmacht, was Plünderungen und Übergriffe auf die Mitarbeiter und ihre Familien verhinderte. Da die Rote Armee Dahlem auf Grund alliierter Absprachen Anfang Juli räumen und an die Amerikaner übergeben musste – Berlin wurde in vier Sektoren aufgeteilt –, fand in den Wochen davor eine fast komplette Demontage des Thiessenschen

Als Dahlem 1945 befreit wurde, konnte Thiessen ein intaktes Institut übergeben

Instituts statt, und das Beutegut wurde in die Sowjetunion verbracht. Thiessen selbst folgte den abziehenden sowjetischen Truppen und siedelte nach Ostberlin über. Er wurde Wochen später zusammen mit seiner Familie und einigen engen Mitarbeitern nach Moskau ausgeflogen, um in der zerstörten Sowjetunion ein funktions- und leistungsfähiges Chemieinstitut aufzubauen.

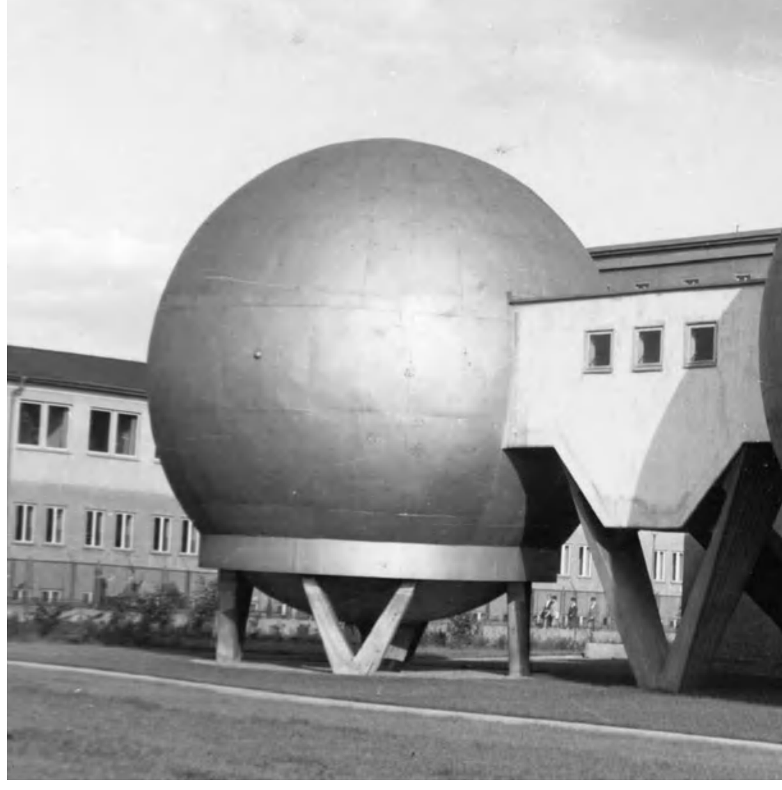
Schon bald wurde Thiessen jedoch in das sowjetische Atombombenprojekt einbezogen. Innerhalb eines größeren Komplexes miteinander verbundener Teilprojekte arbeitete er zusammen mit anderen deutschen Spitzenwissenschaftlern – unter ihnen Manfred von Ardenne, Nikolaus Riehl und Gustav Hertz mit ihren aus Deutschland mitgebrachten Teams. Sie waren in zwei benachbarten geheimen Instituten in der Nähe von Suchumi am Schwarzen Meer an der »abchasischen Riviera« untergebracht worden. Die Lebensbedingungen waren günstig, für die Nachkriegsverhältnisse geradezu komfortabel. Nichtsdestoweniger belasteten die strikte Geheimhaltung der Arbeit, die vollkommene Isolati-



Auch nach seiner Emeritierung blieb Thiessen weiter an seinem Institut in Berlin-Adlershof tätig (hier ein Bild von 1968).

on, die Unmöglichkeit zeitweiliger Heimatbesuche und vor allem die Ungewissheit über die Dauer der Verpflichtung sehr. Es war, wie Nikolaus Riehl seine Erinnerungen überschrieb, ein Einsatz mit offenem Ende in einem »goldenen Käfig«.

Dabei wurden Thiessen und die zahlreichen anderen deutschen Spezialisten vom Kernbereich der Bombenentwicklung ferngehalten; auch fand keine direkte Kooperation mit sowjetischen Forschungsgruppen statt. Thiessens Arbeit galt der Anreicherung und Abtrennung von Uran-235. Dabei war ein Konzept wichtig, das Gustav Hertz in den frühen 1930er Jahren für Edelgase entwickelt hatte: die Isotopentrennung mittels Gasdiffusion durch poröse Medien (Diaphragmen) in Diffusionskaskaden. Es sollte nun auf das Uran angewendet werden. Bei dieser Aufgabe kam Thiessens Kompetenz bei kolloidchemischen Methoden voll zur Geltung. Mit seinem Team entwickelte er ein erfolgreiches Verfahren zur Isotopentrennung mit Diaphragmen auf Nickelbasis. Für seine Leistung erhielt er den Stalinpreis erster Klasse. Hertz dagegen musste seinen Preis zweiter Klasse mit zwei weiteren deutschen Spezialisten teilen. Thiessen selbst hat die Bedeutung des deutschen Beitrags zur sowjetischen Kernwaffenentwicklung später gedämpft eingeschätzt: »Wir waren nützlich, aber nicht notwendig«. Die Nützlichkeit äußerte sich jedenfalls in einem mehrjährigen Zeitgewinn bei der Entwicklung der Atombombe.



Auf Thiessens Idee hin entstanden in Adlershof Kugellabore für Experimente bei konstanter Temperatur. Heute sind sie denkmalgeschützt.

ARCHIV BBAW, ABTEILUNG SAMMLUNGEN, FOTOSAMMLUNG, ZENTRALINSTITUT FÜR PHYSIKALISCHE CHEMIE, NR. 5

Roter Teppich für den Rückkehrer

Die Phase nach dem eigentlichen Forschungseinsatz, vor deren Ablauf niemand in die Heimat entlassen wurde, war im Fall von Thiessen besonders reichlich bemessen. Durfte beispielsweise Gustav Hertz bereits Ende 1954 nach Deutschland zurück, so wurde dies Thiessen erst 1956 gestattet. Die Spezialisten konnten wählen, in welchen der beiden deutschen Staaten sie wollten. Wer sich für die Bundesrepublik entschied, traf auf ein in den Grundzügen vertrautes akademisches Milieu, musste sich aber damit abfinden, dass die begehrten Positionen dort weitgehend schon besetzt waren. Die DDR hingegen hatte dringenden Bedarf an hochqualifizierten und renommierten Naturwissenschaftlern und Technikern. Den Zurückkehrenden wurde buchstäblich der rote Teppich ausgerollt. Es gibt kein zweites Beispiel, dass die DDR-Führung irgendwann ähnlich entschlossen gehandelt hätte, um ein beträchtliches Kontingent von Spitzenkräften an sich zu binden. Thiessen entschied sich für die DDR und nutzte spätestens seit Anfang 1955 alle Möglichkeiten, um von der Sowjetunion aus seinen Eintritt in die DDR-Wissenschaftsszene detailliert vorzubereiten.

Als Thiessen in Berlin ankam, war der Plan für den Bau eines modernen Instituts für Physikalische Chemie der Deutschen Akademie der Wissenschaften (DAW) auf dem neuen Akademiecampus in Adlershof bereits unter Dach und Fach – nach seinen Wünschen gestaltet und künftig unter seiner Leitung stehend. Der 1945 erfolgte Ausschluss aus der Akademie wurde stillschweigend rückgängig gemacht, und als er eine Woche nach seiner Ankunft an einer Klassensitzung teilnahm, agierte er auch in der Praxis wieder als ordentliches Mitglied.

Selbstkritische Bekundungen angesichts seiner früheren herausgehobenen Position im NS-System erwartete von ihm niemand, zumindest kein Politiker. Es kam für ihn auch nicht in Frage, auf seine NSDAP-Mitgliedschaft etwa eine zweite Parteikarriere in der SED oder in einer der Blockparteien folgen zu lassen. In seiner Position konnte er in der DDR als loyaler Parteiloser und Musterbeispiel eines für den sozialistischen Aufbau wirkenden bürgerlichen Wissenschaftlers einen weitaus größeren Einfluss ausüben.

Damals war die institutionelle Ordnung der DAW im Umbruch. Das naturwissenschaftlich-technische Potenzial der DAW wie der DDR überhaupt wuchs rasch, und 1956 waren unterschiedliche Alternativen für die künftige Organisation der Akademie als größte außeruniversitäre Forschungseinrichtung in der Diskussion. Im Februar 1957 setzte die Regierung der DDR eine Kommission ein und berief Thiessen an deren Spitze – gerade einmal zwei Monate nach seiner Ankunft. In kurzer Zeit tarierte er die widerstreitenden Interessen aus und fand einen Modus Vivendi für das Verhältnis von Forschung und Politik, mit dem bis auf Weiteres beide Seiten leben konnten.

Die Arbeiten der Kommission führten zu einer zweifachen institutionellen Neuerung: Erstens entstand innerhalb

In der DDR wurde er zum Musterbeispiel eines für den sozialistischen Aufbau wirkenden bürgerlichen Wissenschaftlers



ARCHIV BBAW, ABTEILUNG SAMMLUNGEN, FOTOSAMMLUNG, ZENTRALINSTITUT FÜR PHYSIKALISCHE CHEMIE, NR. 5

der Akademie im Juni 1957 eine Forschungsgemeinschaft der naturwissenschaftlichen, technischen und medizinischen Institute der DAW zu Berlin – mit einem eigenen Kuratorium und einem eigenen Vorstand. Sie war relativ selbstständig gegenüber der Akademieleitung und damit auch gegenüber dem Einfluss von Akademiemitgliedern aus Westdeutschland abgeschirmt; Thiessen begnügte sich hier mit einem Sitz im Kuratorium. Zweitens wurde ein forschungspolitisches Leitgremium geschaffen, das die naturwissenschaftlich-technischen Forschungen in der gesamten DDR von den Universitäten und Hochschulen über die DAW bis hin zur Industrie strategisch orientieren und koordinieren und zugleich die Regierung beraten sollte: der im August 1957 gegründete Beirat für naturwissenschaftlich-technische Forschung beim Ministerrat der DDR (kurz: Forschungsrat).

Mittler zwischen Wissenschaft und Politik

Es war ein ehrenamtlich tätiges multidisziplinäres Gremium von anfangs 45 durch den Ministerpräsidenten berufenen Mitgliedern, dem ein Ensemble von Zentralen Arbeitskreisen (ZAK) und temporären Kommissionen zugeordnet war. Mit dem Vorsitz in diesem Gremium fand Thiessen noch einmal eine Aufgabe wissenschaftsstrategischen Formats, die seinen Fähigkeiten und Ansprüchen genügte und bei der er an seine in der Sowjetunion, aber auch im Dritten Reich gemachten Erfahrungen anknüpfen konnte.

In seiner von Thiessen geprägten Gestalt war der Forschungsrat eine Art Transferstelle. Er vermittelte einerseits Vorgaben, Auflagen und Anforderungen der Regierung an die Orientierung und Koordinierung des Forschungsbetriebs. Andererseits artikulierte der Forschungsrat die Interessen der Wissenschaft gegenüber der Staatsmacht. Thiessen legte Wert auf ein Gleichgewicht beider Wirkungsrichtungen. Dabei trat er gegenüber dem Staatsapparat und der SED-Führung selbstbewusst und mitunter kritisch auf. Die Aura, die ihn wegen seines in der Sowjetunion verbrachten Jahrzehnts umgab, ließ es selbst höheren Funktionären geraten erscheinen, sich nicht mit ihm anzulegen.

Die von Thiessen angestrebte und persönlich verkörperte Wechselseitigkeit von Wissenschaft und Politik war jedoch fragil. Im politischen System der DDR gab es starke Kräfte, die darauf hinarbeiteten, sie zu erodieren und das Gewicht der Administration sukzessiv zu erhöhen. Die Verschiebung erfolgte langsam, aber stetig. Dies wurde vollends deutlich, als der anfangs kleine hauptamtliche Apparat, der dem ehrenamtlich agierenden Forschungsrat zur Unterstützung zugeordnet war, 1961 zu einem Staatssekretariat und 1967 zum Ministerium für Wissenschaft und Technik expandierte. Dieses verhielt sich gegenüber dem Forschungsrat als übergeordnetes und weisungsberechtigtes Staatsorgan.

Zu der Zeit war Thiessen jedoch nicht mehr in leitenden Funktionen tätig, und seine wissenschaftspolitischen Wirkungsmöglichkeiten schwanden. Sie blieben im Grunde auf die Ära Ulbricht beschränkt, in der er mit hohen Ehrungen bedacht wurde – einschließlich der Mitgliedschaft im ersten Staatsrat, seit 1960 kollektives Staatsoberhaupt der DDR. Das System Honecker setzte in den 1970er und 1980er Jahren andere Prioritäten und vertraute auf eine jüngere, in der DDR sozialisierte Wissenschaftlergeneration, für die Thiessen eher Fossil denn Partner war.

Nach seiner offiziellen Emeritierung 1965 wurde Thiessen im Wesentlichen wieder zu dem experimentierenden Chemiker, als der er begonnen hatte. Ihm war noch ein Vierteljahrhundert beschieden, um in seinem »Alterslaboratorium« an der Akademie über eine Vielzahl von Themen der Tribochemie zu arbeiten. Thiessen erlebte die Endzeit der DDR mit dem Mauerfall vor 30 Jahren und starb am 5. März 1990 in Berlin. Wäre er einige Jahrzehnte jünger gewesen, hätte er gewiss auch im vereinigten Deutschland seine Anpassungsfähigkeit bewiesen. ◂

QUELLEN

Eibl, C.: Der Physikochemiker Peter Adolf Thiessen als Wissenschaftsorganisator (1899–1990). Eine biographische Skizze. phil. Diss. Universität Stuttgart, 1999

Hoffmann, D., Laitko, H.: Peter Adolf Thiessen (1899–1990). Diener vieler Herren. In: Wandlungen und Brüche. Wissenschaftsgeschichte als politische Geschichte. Festschrift für M.G. Ash., V&R unipress, 2018

Laitko, H.: Strategen, Organisatoren, Kritiker, Dissidenten – Verhaltensmuster prominenter Naturwissenschaftler der DDR in den 50er und 60er Jahren des 20. Jahrhunderts. Preprint Nr. 367, MPI für Wissenschaftsgeschichte Berlin, 2009

Schmaltz, F.: Peter Adolf Thiessen und Richard Kuhn und die Chemiewaffen-Forschung im NS-Regime. In: Gemeinschaftsforschung, Bevollmächtigte und der Wissenstransfer. Die Organisation kriegsrelevanter Forschung und die KWG im NS-System. Wallstein-Verlag, 2007

Steinhauser, T. et al.: Hundert Jahre an der Schnittstelle von Chemie und Physik. Das Fritz-Haber-Institut der Max-Planck-Gesellschaft zwischen 1911 und 2011. De Gruyter, 2011

Thiessen, P.A.: Erinnerungen (unpubliziert und im Besitz der Familie; Publikation geplant)

Der Herbst steht vor der Tür!

Denken Sie jetzt schon an Weihnachten!





Die Zeitschrift für Naturwissenschaft, Forschung und Technologie

Print 12 Ausgaben, € 93,–
Digital 12 Ausgaben, € 63,–
Print + Digital € 99,–



Das Magazin für Psychologie, Hirnforschung und Medizin

Print 12 Ausgaben, € 85,20
Digital 12 Ausgaben, € 63,–
Print + Digital € 91,20



Das Magazin für Astronomie und Weltraumforschung

Print 12 Ausgaben, € 93,–
Digital 12 Ausgaben, € 63,–
Print + Digital € 99,–





Der aktuelle Wissensstand der NWT-Forschung

Print 4 Ausgaben, € 30,80
Digital 4 Ausgaben, € 21,–
Print + Digital € 34,80



Die neuesten Erkenntnisse aus dem Bereich der Life Sciences

Print 4 Ausgaben, € 30,80
Digital 4 Ausgaben, € 21,–
Print + Digital € 34,80



Spannende Berichte aus Geschichte und Archäologie

Print 6 Ausgaben, € 31,20
Digital 6 Ausgaben, € 24,60
Print + Digital € 37,20



Das Magazin für den modernen selbstbestimmten Menschen

Print 6 Ausgaben, € 31,20
Digital 6 Ausgaben, € 24,60
Print + Digital € 37,20

ARCHÄOLOGIE
WO WURDE DAS BIER ERFUNDEN?

Bereits in den ersten Städten der Menschheit war der fermentierte Getreidetrunk ein Grundnahrungsmittel. Doch seine Geschichte reicht noch Jahrtausende weiter zurück: in die Morgendämmerung der Jungsteinzeit.

Die Wissenschaftsjournalistin **Luise Loges** studierte Altorientalistik. Sie promoviert derzeit an der archäologischen Fakultät der University of Glasgow zum illegalen Antikenhandel.

spektrum.de/artikel/1675658



SIRWAN REGIONAL PROJECT



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / EMDE-GRAFIK

Der flussnahe Siedlungshügel Khani Masi im heutigen Irak lag einst an wichtigen Handelswegen. Dass dort Bier aus Tongefäßen konsumiert wurde, bewiesen britische Archäologinnen mit modernen chemischen Analysen.

SIRWAN REGIONAL PROJECT

Die Geschichte alkoholischer Getränke reicht weit zurück. Schon im 4. Jahrtausend v. Chr. vergoren die Ägypter und die Bewohner der Levanteküste Traubensaft zu Wein. Geradezu ein Klischee ist der Met als liebster Trunk der Germanen. Tatsächlich lassen sich Spuren fermentierten Honigs bereits in Gefäßen der jungsteinzeitlichen Glockenbecherkultur (etwa 2800–1800 v. Chr.) chemisch nachweisen. Kurz: Viele Kulturen des Altertums schätzten alkoholische Getränke. Die waren nahrhaft und berauschten, was vor allem bei Kult und Ritualen eine Rolle spielte. Außerdem dürften die Menschen bemerkt haben, dass solche Getränke bekömmlicher waren als Wasser. Den Grund kannten sie damals freilich noch nicht: Schon ein geringer Alkoholgehalt wirkt gegen krank machende Keime.

Das wohl älteste Getränk dieser Art ist allerdings das aus fermentiertem Getreide gebraute Bier. Bis vor Kurzem galt es als eine Erfindung der »neolithischen Revolutionäre«, das heißt der ersten sesshaften Bauern im Gebiet des Fruchtbaren Halbmonds. Seine Bedeutung habe es dann in den ersten städtisch geprägten Gesellschaften erhalten, glaubten die Experten. Neuerdings mehren sich jedoch Hinweise darauf, dass diese Vorstellung korrigiert werden muss.

Dank naturwissenschaftlicher Methoden lässt sich die Geschichte dieser Getränketechnologie immer weiter zurückverfolgen. So wurde Bier vermutlich bereits in Vor-

derasien getrunken, als die Menschen noch nicht in festen Dörfern lebten und Äcker bestellten. Ein Indiz dafür stammt aus der Kultanlage auf dem Göbekli Tepe in Südostanatolien, die Archäologen auf das 10. Jahrtausend v. Chr. datieren (siehe »Steinerne Symbole einer neuen Zeit«, Spektrum Spezial Archäologie Geschichte Kultur 2.17, S. 10). Damit bilden die mit Reliefs verzierten und zu Kreisen angeordneten Steinpfeiler das älteste monumentale Bauwerk der Menschheit. Damals, im »akeramischen Neolithikum«, lebten die Menschen zwar noch als Wildbeuter und ohne Tongefäße. Doch weil ein günstiges Klima Körner tragende Gräser wie wilde Gerste reichlich wachsen ließ, blieben die Menschen saisonal am Ort und ernteten, ohne gesät zu haben (siehe »Die ersten Bauern Europas«, Spektrum Spezial Archäologie Geschichte Kultur 4.18, S. 22).

Bei Grabungen entdeckten Archäologen auf dem Göbekli Tepe unter anderem Kalksteintröge (siehe Bild rechts unten) mit Spuren von Kalziumoxalat, das auch als Bierstein bekannt ist, da es beim Brauen als unerwünschtes Nebenprodukt entstehen kann. Allerdings bilden manche Pflanzen solche Salzkristalle als Schutz gegen Fraßfeinde, es könnte sich also auch um Rückstände aus der Zubereitung von Mahlzeiten handeln. Für den 2014 verstorbenen Grabungsleiter, den Berliner Prähistoriker Klaus Schmidt, passt Bierstein aber besser zum Gesamtbild: Gruppen von Wildbeutern errichteten die Kultanlagen auf dem Göbekli Tepe wohl zu Ehren ihrer Ahnen. Aus Gräsersamen hätten sie ein Bier gebraut, das Teil der Rituale gewesen sein mochte. Denn Alkohol verändert das Bewusstsein. Auch in Stammesgruppen der jüngeren Vergangenheit diente er, in geringen Mengen getrunken, dazu, den Kontakt zu einer Welt der Ahnen, Geister oder Götter herzustellen.

Ein letztes Geleit

Andere prähistorische Gruppen entdeckten ebenfalls das Geheimnis des Brauens. In mehreren Grabungskampagnen von 2004 bis 2011 hatten Archäologen in der Raqefet-Höhle nahe Haifa (Israel) mehr als zwei Dutzend menschliche Skelette aus der Zeit von etwa 11700 bis 9700 v. Chr. frei gelegt, dazu Tierknochen und zwei kegelförmige Gefäße aus massivem Kalkstein, die beide tiefer als 30 Zentimeter und in den Untergrund eingegraben waren. Die Forscher vermuteten, dass man darin Nahrung zubereitet und aufbewahrt hat. Womöglich gaben damals die Menschen der so genannten Natufien-Kultur ihren Verstorbenen das letzte Geleit mit einem Festmahl oder ließen Nahrungsmittel als Grabbeigaben zurück.

Ein Team unter Leitung des Ostasienarchäologen Li Liu von der Stanford University hat die Steintröge mikrobotanisch untersucht. Dazu reinigten die Forscher mehrmals die Innenseiten mit Zahnbürsten von anhaftender Erde; zudem nahmen sie Referenzproben des Bodens, um eine Kontamination später besser zu erkennen. Mit destilliertem Wasser spülten sie die Oberflächen nach jedem Putzen, ließen die Flüssigkeit eintrocknen und betrachteten die Rückstände unter dem Mikroskop. Dort erblickten sie Stärkekörnchen, die den Formen nach von Wildgerste in verschiedenen Reifegraden stammten, dazu kamen Reste etwa von Flachs, Hanf, Jute und Baumwolle.

Außerdem nahmen die Forscher mit Polyvinylsiloxan, einer weichen Formmasse aus der Zahnmedizin, Abdrücke von der Oberfläche. Diese offenbarten unter dem Mikroskop charakteristische Gebrauchsspuren: Die Bottiche dienten einst als Mörser. Da solche Behältnisse vor dem Aufkommen der Töpferei ideal waren, um Flüssigkeiten aufzubewahren, deuten die Wissenschaftler die Stärkereste als Hinweis: In den Trögen gärte Gerstenmaische. Also stellten die Angehörigen einer Gemeinschaft in der Rafeqet-Höhle wohl ebenfalls Bier her, vermutlich als Teil ihres Begräbniskults.

Der Brauprozess dürfte dieselben drei Grundschritte wie heute umfasst haben (siehe »Brauereien: Was den Geschmack von Bier bestimmt«, spektrum.de/news/1656728), freilich in deutlich einfacherer Form: Man legte Ähren in Wasser, damit sie keimten, und ließ sie nach einigen Tagen trocknen. Sie erhielten eine Art Malz, das man zerkleinerte und mit Wasser versetzte. Diese Maische blieb dann eine Zeit lang abgedeckt stehen. Heute wissen Biotechnologen, dass beim Mälzen Enzyme entstehen, die Getreidestärke in



Eine »Proto-Keilschrift« sollte die Verwaltung Uruks unterstützen. Die Tafel (3300–3100 v. Chr.) zeigt im unteren Teil stilisierte Köpfe und Schalen, vermutlich Symbole der Lebensmittelrationen, die als Lohn gezahlt wurden.

AUF EINEN BLICK
FRÜH BRAUTE SICH WAS ZUSAMMEN

1. In fast 14000 Jahre alten Steinbottichen entdeckten Archäologen Hinweise, dass man darin Bier aus Wildgerste braute, wohl im Rahmen des Totenkults.

2. Ernteüberschüsse führten in Mesopotamien zu Bevölkerungswachstum, Stadtgründungen – und zu einem recht professionellen Brauwesen, das zeitweise in den Händen von Frauen lag.

3. Da Schriftquellen und bildliche Darstellungen viele Fragen insbesondere zur Kulturgeschichte offenlassen, analysieren Forscher nun Rückstände in Trinkgefäßen.

Zuckermoleküle aufspalten. Hefen können diese während des Maischens in Ethanol umsetzen. Das Ergebnis der prähistorischen Fermentation war wohl ein Bier mit allenfalls ein bis zwei Prozent Alkoholgehalt. Es hätte heutigen Gaumen vermutlich nicht gemundet, denn es enthielt sicher noch Tresterreste und Schwebstoffe. Dazu kamen saure Nebenprodukte auf Grund von Bakterien in der Maische.

Bislang sind dies die einzigen Hinweise auf ein Bierbrauen in akeramischer Zeit. Forscher nehmen zwar an, dass es auch in späteren prähistorischen Kulturen eine wichtige Rolle spielte, doch Spuren davon gibt es kaum. Erst mit der Erfindung der Schrift mehren sich wieder die Belege, zudem gibt es nun Informationen zu den eingesetzten Prozessen und zum gesellschaftlichen Kontext. Dabei erwuchs letztlich die Schrift selbst auf der Grundlage landwirtschaftlicher Erträge. Denn es dürfte die Erfindung der Bewässerung gewesen sein, die um etwa 3900 v. Chr. die Bevölkerung an den Ufern von Euphrat und Tigris stark anwachsen ließ. Diese Technik machte die Bauern unabhängig von den geringen Niederschlagsmengen der Region, und sie erwirtschafteten Überschüsse an Getreide.

Bier als Grundnahrungsmittel

Mehr Menschen konnten ernährt werden, die Siedlungen wuchsen. Arbeitsteilung war geboten: Einige Bewohner bestellten Felder, andere fertigten Werkzeuge und Tongefäße. Wieder andere verstanden sich auf das Heilen von Krankheiten, auf die Vorhersage der richtigen Zeitpunkte für Saat und Ernte oder vermittelten zwischen vermuteten übernatürlichen Mächten und den Menschen.

Schließlich entstanden die ersten Städte und damit eine neue Art des Zusammenlebens. Vorräte und andere Güter mussten verwaltet, gemeinschaftliche Arbeiten organisiert werden. Die Schrift entwickelte sich als Werkzeug dieser Administration. Schon die ältesten bekannten Tontäfelchen befassten sich vermutlich auch mit dem Bier. Jedenfalls deuten Forscher die Symbole, aus denen sich die Keilschrift entwickeln sollte, als Piktogramme für Lebensmittelrationen (siehe Bild links), den typischen Arbeitslohn.

Denn Bier diente als Nahrungsmittel, lieferte Kalorien, Vitamine und Mineralien. Forscher nehmen zudem an, dass mit der Urbanität erstmals ein Phänomen auftrat, das die Menschheit über Jahrtausende begleitete: Abfälle und Ausscheidungen verschmutzten die Flüsse, in Mesopotamien die wichtigste Trinkwasserquelle. Leicht alkoholische Getränke wie Bier waren die gesündere Alternative.

Während der altbabylonischen Periode (etwa 1800–1595 v. Chr.), wahrscheinlich auch schon davor, lag das kommerzielle Bierbrauen wohl vorwiegend in den Händen von Frauen. Darauf deuten zahlreiche Erwähnungen von Brauerinnen (akkadisch »sabitum«) in Briefen und juristischen Texten hin. Diese Frauen leiteten auch Gasthäuser und verliehen Gerste sowie Bierrationen an Bauern. Die wiederum beschäftigten Saisonarbeiter und entlohnten sie mit Getreide – neben Silber diente Korn als Zahlungsmittel. In diesem Sinn fungierten die Brauerinnen auch als Bank. Es gibt etliche Briefe Verzweifelter, die sich heillos bei einer solchen Unternehmerin verschuldet hatten.

Die berühmte Gesetzessammlung des Königs Hammurapi enthält gleich mehrere Anweisungen, die das Geschäft dieser Frauen regelten. Unter anderem sollte eine Wirtin mit dem Tod bestraft werden, wenn sie Bier panschte oder sich in Silber an Stelle von Getreide bezahlen ließ. Eine von ihnen schaffte es vielleicht sogar bis an die Spitze der Gesellschaft: Die »sumerische Königsliste«, die eine Reihe eher mythischer Herrscher der sumerischen Stadtstaaten aufführt, nennt als einzige Frau eine Königin Ku-Bau in der Stadt Kisch – und bezeichnet sie als ehemalige Tavernenwirtin. Auch wenn sich die geschichtliche Wirklichkeit Ku-Baus nicht nachweisen lässt, macht die Liste zumindest deutlich, dass das Bierbrauen im bronzezeitlichen Zweistromland ein angesehener Beruf war.

NICO BECKER / DAI

In Göbekli Tepe, dem ältesten bekannten Heiligtum der Menschheit, kamen Steintröge ans Licht, die Rückstände von Kalziumoxalat aufweisen, besser bekannt als Bierstein.





Eine weitere literarische Vertreterin dieser Profession war Siduri, eine niedere Weisheitsgöttin aus dem Gilgamesch-Epos. Sie habe eine Taverne am Ende der Welt betrieben, genauer gesagt am Ufer jenes Ozeans, der in der mesopotamischen Kosmologie die Erde umschloss. Dem nach Unsterblichkeit suchenden Gilgamesch empfahl sie, umzukehren und sich am Leben zu erfreuen. Ein gut gemeinter Rat, wie man ihn eben von einer Wirtin erhalten mochte, die sich mit dem Leben auskannte.

Die Göttin der Braukunst war aber nicht Siduri, sondern Ninkasi. Eine ihr gewidmete Hymne listete einige Prozessschritte und Ingredienzien auf: »Du bist es, die das Bierbrot in einem großen Ofen backt und die Haufen geschälten Getreides ordnet / Du bist es, die das mit Erde bedeckte Malz mit Wasser gießt / … / Du bist es, die das Malz in einem Krug einweicht / die Wellen steigen, die Wellen fallen / Du bist es, die den gekochten Brei auf einer großen Schilfmatte ausbreitet.«

Das Bierbrot war wohl eine Art Hefeteig, der die Gärung in Gang bringen sollte. Des Weiteren ist von einem Gärbottich die Rede und vom Trocknen der Maische auf Schilfmatten. Der Hymnus verrät noch, dass Honig und Wein dazukamen und das Gemisch gefiltert wurde, vermutlich durch ein Behältnis mit perforiertem Boden: »Du bist es, die das Braugefäß mit einem angenehmen Geräusch auf das Sammelgefäß stellt. / Du bist es, die das gefilterte Bier aus dem Sammelgefäß ausschenkt; es ist wie der Ansturm von Tigris und Euphrat.«

Zwar bleiben die genauen Abläufe im Dunkeln, literarische Quellen und Verwaltungsdokumente verraten jedoch auch etwas über die eingesetzten Rohstoffe. Es gab beispielsweise neben dem Gerstentrunk ein Bier auf der Basis von Emmer, einer Vorform des Weizens. Man unterschied zudem verschiedene Qualitäten: Es gab »schwarzes«, »rotes« oder »goldenes« Bier sowie Produkte unterschiedlicher Süße.

Forscher kennen auch bildliche Darstellungen zum Thema, die geben aber mehr Rätsel auf, als sie Antworten bereithalten. So irritieren Terrakottaplaketten aus der altbabylonischen Periode (etwa 1800–1595 v. Chr.) mit dem immer gleichen Motiv: ein Paar beim Geschlechtsakt, die Frau trinkt dabei vornübergebeugt mit einem Röhrchen aus einem Krug. War dies eine altorientalische Form von Pornografie? Oder illustrieren die Plaketten ein religiöses Ritual? Bislang haben die Gelehrten noch keinen Konsens dazu gefunden. Klar ist nur, dass solche Szenen aus der Mode kamen und verschwanden.

Nicht so hingegen Abbildungen von hochgestellten Persönlichkeiten beim Bankett, die Becher, Trinkschalen oder hohe Gefäße halten, aus denen sie mit Röhrchen saugen (siehe Bild unten). Doch bei welchen Anlässen welches Behältnis angemessen war und was man dabei einschenkte, bleibt vorerst ein Rätsel.

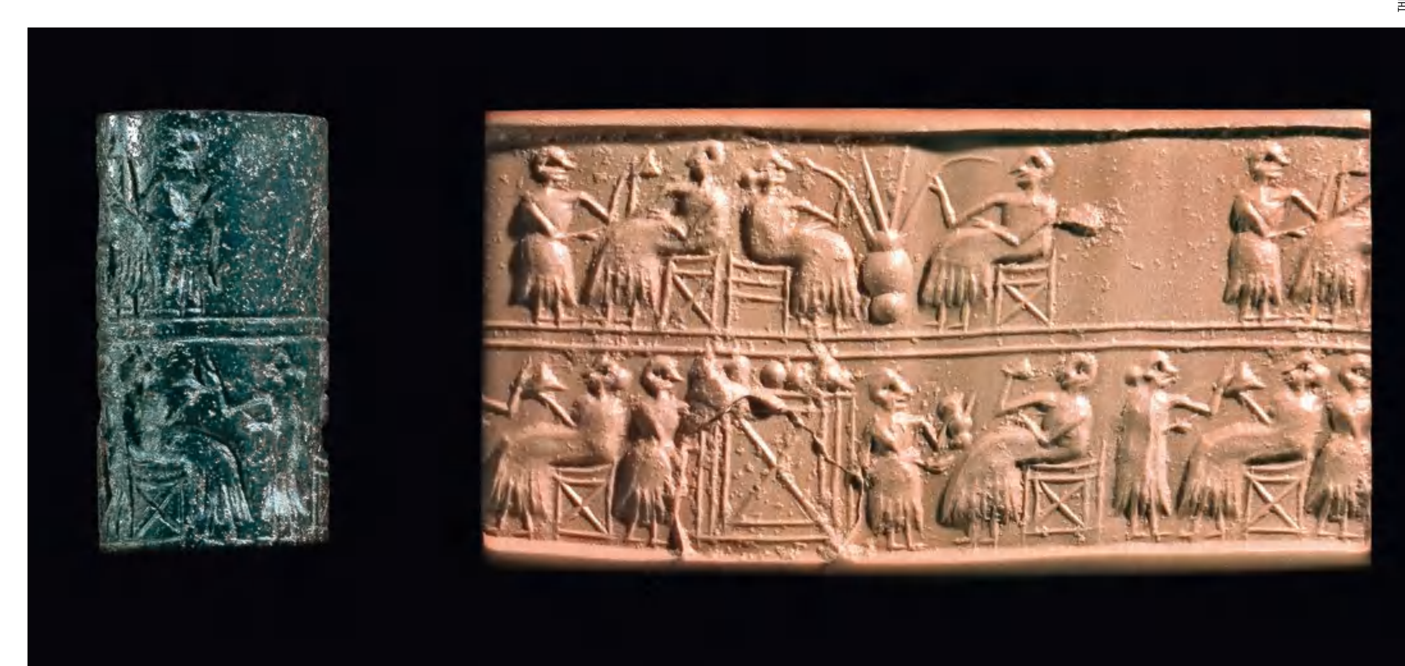
Die Tempel-Brauer

Das gilt auch für die späte Bronzezeit, also die zweite Hälfte des 2. Jahrtausends v. Chr. Im Jahr 2005 legte das Team des Marburger Prähistorikers Andreas Müller-Karpe in Kuşaklı, einer hethitischen Stadt in Zentralanatolien, ein großes Gebäude frei, das die Forscher als Brauerei eines benachbarten Tempels deuteten. Dafür sprachen Schalen, Krüge und Siebe aus Ton sowie bronzene Röhrchen mit Sieben an ihren Unterseiten; Letztere dienten wohl dazu, Schwebstoffe zu filtern.

Solche Röhrchen kamen auch im zeitgleichen Tell Bazi am oberen Euphrat zu Tage. Das Team der Münchner Archäologin Adelheid Otto untersuchte dort in den 1990er Jahren rund 50 Wohnhäuser aus der mittleren und späten Bronzezeit. Darin stießen die Forscher auf Getreidemühlen und Vorratsgefäße, außerdem auf große Bottiche mit Spuren von Kalziumoxalat. Anders als in Kuşaklı brauten die Bewohner das Bier aber vermutlich für den Eigenbedarf.

In Tell Hadidi, ebenfalls am syrischen Euphrat gelegen, deuten Tontafeln auf eine weitere Variante hin: Der Besitzer nutzte Vorratsgefäße, Mahlsteine und Gefäße mit siebartig durchlöcherten Böden – die schon erwähnten Braugefäße – offenbar in großem Stil. Die Ausgräber gehen deshalb davon aus, dass er für den Verkauf braute. Spätestens im

Zwei Personen, mutmaßlich Angehörige der Elite, trinken mit langen Röhrchen aus einem Gefäß. Die Szene auf einem etwa 4600 Jahre alten Rollsiegel (links, Abdruck dazu rechts), erinnert an Grabungsfunde in »Brauereien«.





SIRWAN REGIONAL PROJECT

In Khani Masi entdeckte »kassitische Flaschen« scheinen mit ihrem kleinen Fuß eigentlich unpraktisch, enthielten aber einst tatsächlich wohl Bier.

15. Jahrhundert v. Chr. stand dieser Geschäftszweig also auch Männern offen.

Bildliche Darstellungen, Texte und archäologische Funde – nach wie vor ergeben die Informationen noch kein schlüssiges Gesamtmodell für den gesellschaftlichen Kontext. Chemische Analysen von Rückständen in Trinkgefäßen wären auch für diesen Kulturraum hilfreich, doch solche Funde sind selten und die Untersuchungen heikel. Ein empfindlicheres Verfahren entwickelt die Archäologin Elsa Perruchini derzeit im Rahmen ihrer Doktorarbeit an der University of Glasgow. Ihr Studienobjekt sind Keramikgefäße aus Khani Masi im heutigen Irakisch-Kurdistan.

Dieser Siedlungshügel liegt am Oberlauf des Diyala (kurdisch: Sirwan), der aus dem Zagros-Gebirge in den Tigris fließt und dessen fruchtbare Flussauen während des Altertums stets dicht besiedelt waren. Trotz seiner strategisch wichtigen Position am Handels- und Heerweg in den Iran wird der Landstrich erst seit 2013 archäologisch erforscht. Das Sirwan Regional Project, geleitet von Claudia Glatz von der Glasgow University und Jesse Casana vom amerikanischen Dartmouth College, führt hier ein Survey und erste Ausgrabungen durch.

Zwischen etwa 1500 und 1100 v. Chr., als Mesopotamien von der babylonischen Kassitendynastie beherrscht wurde, war das an Handels- und Heerwegen gelegene Khani Masi offenbar ein regionales Zentrum. Glatz und Casana graben dort seit 2014. Gleich zu Anfang entdeckten sie in einem der Gebäude zahlreiche dünnwandige Tonbecher mit viel zu schmalen Füßen, um sie vollgefüllt abzustellen. Eine weitere und für die Zeit typische Gefäßform waren »kassitische Flaschen« (siehe Bild oben). Dabei handelt es sich um hohe, schlanke Krüge mit einem verhältnismäßig schmalen Fuß. Doch auch diese hätten in vollem Zustand nicht stabil gestanden. In beiden Fällen fragten sich die Ausgräber deshalb, ob sie tatsächlich Trinkgefäße waren.

Mit bloßem Auge waren keine Rückstände etwa anhand von Verfärbungen zu erkennen. Perruchini und die Glasgower Forscherin Jamie Toney nutzten dann aber die Gaschromatografie für einen Nachweis. Die Methode trennt ein Gemisch von flüchtigen chemischen Verbindungen so, dass man die Stoffe identifizieren kann. In diesem Fall suchte die Forscherin nach chemischen Verbindungen, die in heutigen Biersorten vorkommen. Als Vergleichsproben dienten Bier aus verschiedenen Getreidesorten sowie mögliche Zusatzstoffe wie Muskatnuss. In der Pharmakologie und Biologie ist die Technik seit Langem etabliert. Mit der Analyse von Flüssigkeitsrückständen in den Poren archäologischer Keramikgefäße betraten Perruchini und ihre Kollegen jedoch Neuland.

Um die Messungen nicht zu verfälschen, gruben sie die Objekte selbst vor Ort aus, wobei sterile Handschuhe aus Baumwolle eine Kontamination verhinderten. Die Scherben packten sie in Aluminiumfolie. Plastik wäre ungeeignet gewesen, denn manche Weichmacher ähneln chemisch den gesuchten Substanzen.

Die Scherben wurden pulverisiert und verdampft. Der Gaschromatograf belegte: Die unpraktischen Becher und Flaschen hatten einst Bier enthalten. Möglicherweise waren die Flaschen bei Festen, Ritualen oder ähnlichen Gelegenheiten ohne Absetzen von einem zum anderen herumgereicht worden, während die Becher wohl eher nur von stets der gleichen Person gehalten wurden. Mit demselben Verfahren bestätigte die Forscherin, dass ein Bottich mit perforiertem Boden aus Khani Masi tatsächlich zum Abseihen vergorener Maische gedient hatte.

Gute Aussichten für die Biergeschichte

Alles in allem sind die ersten Ergebnisse viel versprechend. Zudem sollte sich die Methode auch für weitere Flüssigkeiten eignen. Perruchini interessieren insbesondere Produkte und Substanzen, die aus anderen Gebieten oder Reichen importiert wurden und sich beispielsweise in den Poren von Parfümfläschchen oder Schminktiegeln nachweisen lassen. Vor allem aber können die Gaschromatografie und das an den Trögen aus der israelischen Raqefet-Höhle eingesetzte mikroskopische Verfahren helfen, die Lücken in der Kultur- und Technikgeschichte des Bierbrauens zu schließen. So wurde zum Beispiel noch nicht untersucht, welche Rolle es bei der Ausbreitung der Landwirtschaft vom Vorderen Orient in alle Welt spielte. Hatten Europas erste Bauern das Knowhow im Gepäck, oder mussten sie es in der neuen Heimat abermals entwickeln? Viele spannende Fragen zum vermutlich ältesten alkoholischen Getränk der Menschheit harren der Beantwortung. ◂

QUELLEN

Dietrich, O. et al.: The role of cult and feasting in the emergence of Neolithic communities. New evidence from Göbekli Tepe, south-eastern Turkey. Antiquity 86, 2012

Liu, L. et al.: Fermented beverage and food storage in 13000 y-old stone mortars at Raqefet Cave, Israel: Investigating Natufian ritual feasting. Journal of Archaeological Science: Reports 21, 2018

Perruchini, E. et al.: Revealing invisible brews: A new approach to the chemical identification of ancient beer. Journal of Archaeological Science 100, 2018

MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN
DORNRÖSCHEN UND DIE WAHRSCHEINLICHKEITS-RECHNUNG

Wecken oder nicht wecken: Das ist hier die Frage.

Christoph Pöppe ist promovierter Mathematiker und war bis 2018 Redakteur bei **Spektrum** der Wissenschaft.

spektrum.de/artikel/1675660

Als Dornröschen, von einem wagemutigen Prinzen geküsst, aus dem hundertjährigen Tiefschlaf erwacht, ist sie im ersten Moment – wenig erstaunlich – desorientiert. Es war doch erst gestern, dass ihr 15. Geburtstag hätte gefeiert werden sollen; doch irgendetwas Merkwürdiges ist dazwischengekommen. Und an den Rest erinnert sie sich nicht mehr. Welchen Wochentag wir heute haben? Keine Ahnung, ganz abgesehen davon, dass im Moment sowieso alle ihre Gedanken beim Prinzen sind.

Dornröschen ist wach und im Vollbesitz ihrer geistigen Kräfte, weiß aber nicht, wo auf der Zeitachse sie sich gerade befindet: Das ist der einzige Anknüpfungspunkt zwischen dem bekannten Märchen der Gebrüder Grimm und einem ziemlich prosaischen Gedankenexperiment gleichen Namens.

In diesem kommt Dornröschen, die in der englischen Fassung »Sleeping Beauty« heißt, am Sonntag ins Labor, wo ihr der Versuchsleiter das Experiment erläutert, dem sie unterzogen werden soll, und sicherstellt, dass sie es in allen Einzelheiten verstanden hat. Sie wird am Sonntagabend zu Bett gehen. Er wird, vor ihr verborgen, eine faire Münze werfen. Unabhängig vom Ergebnis des Wurfs wird er sie am Montag wecken und ihr ein paar Fragen stellen; darauf verabreicht er ihr eine Droge, die sie nicht nur wieder in den Schlaf versetzt, sondern auch ihre Erinnerung an die Erweckung samt Befragung auslöscht. Wenn die Münze »Kopf« zeigt, tut er nichts weiter. Fällt sie aber so, dass »Zahl« oben liegt, wiederholt er am Dienstag dasselbe Prozedere aus Aufwecken, Befragen und Löschen der Erinnerung wie am Montag. Am Mittwoch wacht Dornröschen auf und erinnert sich an nichts von dem, was ihr seit Sonntag widerfahren ist.

Ein Problem, zwei plausible Lösungen

Interessant wird die bis jetzt eher schläfrige Angelegenheit durch die Frage, die der Versuchsleiter ihr während der kurzen Wachphasen stellt: »Mit welcher Wahrscheinlichkeit, glaubst du, zeigte die Münze Kopf?« Es gibt nämlich zwei Antworten. Jede von ihnen hat gute Argumente für sich; die Kontroverse schwelt seit mehr als 20 Jahren, und ein Ende ist nicht abzusehen. Als der Kolumnist Pradeep Mutalik im Januar 2016 den Lesern des »Quanta Magazine« das Problem vorlegte, erntete er eine Flut von Kommentaren. Peter Winkler, Mathematiker am Dartmouth College in Hanover (New Hampshire) und einer der eifrigsten Diskutanten, sah sich ein Jahr später zu einem zusammenfassenden Artikel veranlasst.

Die erste Antwort lautet: »Selbstverständlich ein halb!« Dornröschen hat nämlich vor Beginn des Experiments erfahren, dass die Münze fair ist, das heißt, mit gleicher Wahrscheinlichkeit auf Kopf wie auf Zahl fällt. Also war ihre subjektive Wahrscheinlichkeit am Sonntag noch



Im mathematischen Gedankenexperiment wird Dornröschen geweckt, eine Münze geworfen, und je nach Ausgang des Wurfs wieder in den Schlaf versetzt oder nicht.

gleich ein halb, und durch das Aufwecken hat sie keine neue Information erworben, die das revidieren könnte. Schließlich hat sie schon am Sonntag gewusst, dass sie geweckt werden würde, und auch das hat an ihrer Einschätzung nichts geändert.

Die zweite Antwort lautet: »Selbstverständlich ein Drittel!« Im Moment ihrer Erweckung befindet sich Dornröschen, wie sie weiß, in einem von drei Szenarien: Es ist Montag, und die Münze zeigt Kopf, kurz (M, K); Montag und Zahl (M, Z); Dienstag und Zahl (D, Z). Die drei sind für sie ununterscheidbar, denn sie bekommt weder einen Kalender noch die Münze zu sehen. Also bleibt ihr nichts anderes übrig, als jedem Ereignis die gleiche Wahrscheinlichkeit zuzuweisen. Da in nur einem der drei die Münze Kopf zeigt, ist das Ergebnis klar.

Wie kann es zu diesem offenkundigen Widerspruch kommen? Auf den ersten Blick handelt es sich um ein einfaches, wohlgestelltes Problem der Wahrscheinlichkeitsrechnung. Dieses Gebiet der Mathematik verfügt über einen Satz etablierter Rechenregeln, mit deren Hilfe eine eindeutige Lösung zu finden sein sollte. Nur ist das Problem nicht in erster Linie ein mathematisches. Die Mathematiker haben sich nämlich wohlweislich um eine klare Aussage darüber gedrückt, was eine Wahrscheinlichkeit eigentlich ist. Ihre Theorie beschränkt sich darauf, Wahrscheinlichkeiten gewisser Ereignisse in solche anderer Ereignisse umzurechnen.

Das gilt auch für subjektive Wahrscheinlichkeiten; aber das Konzept ist heimtückischer, als es scheint. Einem breiten Publikum ist das deutlich geworden bei dem berüchtigten Ziegenproblem, das seit seiner Veröffentlichung vor fast 30 Jahren immer wieder die Gemüter erregt (**Spektrum** November 1991, S. 12, nachgedruckt in »Mathematische Spiele und Strategien«, **Spektrum** Highlights Februar 2015, S. 6).

In einer Show wird der Kandidat vor die Aufgabe gestellt, aus drei Türen namens A, B und C die »richtige« auszuwählen; hinter einer von ihnen verbirgt sich der Hauptgewinn, hinter den beiden anderen steht jeweils eine Ziege als Symbol für eine Niete. Wählt er zum Beispiel Tür A, so öffnet der Showmaster nicht diese, sondern eine andere, etwa B; hinter ihr kommt eine Ziege zum Vorschein. Daraufhin fragt er: »Wollen Sie Ihre Wahl revidieren?« Und so verrückt das klingt: Der Kandidat verbessert seine Chancen, wenn er das Angebot des Showmasters annimmt und Tür C wählt.

Die objektiven Wahrscheinlichkeiten sind so trivial, dass man gar nicht von Wahrscheinlichkeiten sprechen mag. Auto und Ziegen sind ja längst am Platz, daher ist die Wahrscheinlichkeit dafür, dass das Auto hinter einer bestimmten Tür steht, gleich eins und für die anderen Türen null. Die subjektive Wahrscheinlichkeit im Kopf des Kandidaten ist dagegen ein Drittel für jede Tür. Das folgt aus dem, was die Philosophen das Indifferenzprinzip nennen: Wenn es nichts gibt, das – nach deinem Wissensstand – mehrere Ereignisse voneinander unterscheidet, dann musst du jedem die gleiche Wahrscheinlichkeit zuweisen. Subjektive Wahrscheinlichkeiten sagen also in erster Linie etwas über das Bewusstsein des Subjekts aus und allenfalls indirekt etwas über den tatsächlichen Zustand der Welt.

Durch das Öffnen von Tür B sinkt die subjektive Wahrscheinlichkeit für diese von einem Drittel auf null – so weit unproblematisch. Aber dieses Drittel verteilt sich nicht etwa gleichmäßig auf die beiden anderen Türen, sondern wandert komplett zu Tür C. Das ist schwer zu glauben, denn die neue Information »hinter Tür B ist eine Ziege« macht keinen Unterschied zwischen A und C.

Die Lösung des Ziegenproblems – über die es im Gegensatz zum Dornröschenproblem keinen nennenswerten Dissens gibt – gelingt, indem man sämtliche möglichen Szenarien auszählt und feststellt, dass tatsächlich in zwei Dritteln aller Fälle die Revision der ursprünglichen Wahl die richtige Entscheidung ist. Nachzuweisen, dass alle diese Szenarien gleich wahrscheinlich sind, fällt nicht schwer; also ist die subjektive Wahrscheinlichkeit – in dem genannten Beispiel – für Tür C gleich zwei Drittel.

Unproblematisches Ziegenproblem

An dem Ziegenproblem zeigt sich zweierlei. Erstens: So subjektiv, wie der Name suggeriert, sind subjektive Wahrscheinlichkeiten nicht. Vielmehr geht es um Einschätzungen, die sich im Kopf des Subjekts einstellen, wenn dieses vollkommen rational denkt, das heißt insbesondere die oben angedeuteten Auszählungen und zugehörigen logischen Schlüsse fehlerfrei ausführt. Zweitens kommt hier eine geläufige Auffassung zur Geltung: Wenn man ein und dasselbe Experiment, etwa einen Wurf mit einer fairen Münze, sehr oft wiederholt, dann streben die relativen Häufigkeiten von Kopf und Zahl gegen ein halb, und diesen Grenzwert definiert man als die Wahrscheinlichkeit des jeweiligen Ereignisses. Ganz analog kommt der Kandidat zur richtigen Lösung, indem er sich vorstellt, er gerate sehr häufig in diese Situation, und dann das tut, was unter diesen realitätsfernen Umständen optimal ist.

Es gibt zwei Antworten. Jede von ihnen hat gute Argumente für sich; die Kontroverse schwelt seit mehr als 20 Jahren

Unterstellen wir also, dass auch Dornröschen eine perfekt rationale Denkerin ist. Dann müsste sie doch, nachdem sie alle Einzelheiten des Experiments erfahren und verstanden hat, zu einem eindeutigen Ergebnis kommen. Wieso gelingt das den zahlreichen Wissenschaftlern nicht, die darüber intensiv nachgedacht haben? Wie kommt es, dass die Zunft sich in zwei Lager teilt, die »Drittler« (»thirders«) und die »Halbierer« (»halfers«), die trotz heftiger Diskussion nicht zueinander finden?

Natürlich klopft jede Seite die Argumente der Gegner ab, auf der Suche nach Schwachstellen. Während die drei Türen im Ziegenproblem ohne Zweifel völlig gleichartig sind, ist das für die drei Möglichkeiten (M, K), (M, Z) und (D, Z), mit denen Dornröschen sich auseinanderzusetzen hat, nicht so offensichtlich.

Gleichwohl sind sie subjektiv gleich wahrscheinlich, argumentiert der Philosoph Adam Elga von der Princeton University in einer Arbeit, die er im Jahr 2000 (damals noch am Massachusetts Institute of Technology) veröffentlichte und mit der er die ganze Diskussion auslöste. Zum Beweis denkt er über Varianten des Experiments nach wie diese: Kurz nachdem Dornröschen aufgewacht ist, informiert sie der Versuchsleiter, dass heute Montag ist. Daraufhin kommt sie, allseits unbestritten, zu dem Ergebnis, dass Kopf und Zahl gleich wahrscheinlich sind. Da ihr unmittelbar darauf die Einschlaf- und Vergessensdroge verabreicht wird, hat die Information noch nicht einmal einen Einfluss auf den weiteren Verlauf des Experiments.

In einer anderen Variante informiert der Experimentator sein Versuchskaninchen, dass Zahl gefallen ist – woraufhin Dornröschen rationalerweise die Ereignisse »heute ist Montag« und »heute ist Dienstag« als gleich wahrscheinlich ansieht. Nun kann man das Konzept der bedingten Wahrscheinlichkeit anwenden. Gemeint ist die Wahrscheinlichkeit in einer Ereignismenge, die durch eine Bedingung – zum Beispiel »heute ist Montag« – eingeschränkt ist. Begrifflich ist das Ereignis »Kopf und Montag«, das in der vollständigen Ereignismenge liegt, zu unterscheiden von dem Ereignis »Kopf«, das in der durch die Bedingung »es ist Montag« eingeschränkten Ereignismenge enthalten ist.

Aber ein elementarer Satz der Wahrscheinlichkeitstheorie sagt: Wenn die bedingten Wahrscheinlichkeiten gleich

sind, dann muss das auch für die entsprechenden Wahrscheinlichkeiten in der vollständigen Menge gelten. Sie sind im Allgemeinen nicht dieselben wie zuvor, aber untereinander gleich. In Formeln: P(M, K) = P(M, Z) nach dem Ergebnis der ersten Variante des Experiments (P ist die Abkürzung für probability, Wahrscheinlichkeit) sowie P(M, Z) = P(D, Z) nach der zweiten Variante. Das lässt sich leicht zusammenfassen zu P(M, K) = P(M, Z) = P(D, Z), und da sich alle drei Wahrscheinlichkeiten zu eins summieren müssen, ist jede von ihnen gleich ein Drittel, was zu beweisen war.

Elgas Gegenspieler ist David Lewis, ebenfalls Philosoph an der Princeton University, der dagegen darauf beharrt, dass Dornröschen im Schlaf von Sonntag auf Montag unter keinen Umständen neue relevante Information erworben haben kann. Auch dass sie nunmehr wach ist, kann für sie nicht neu sein; schließlich wusste sie das schon nach der Vorbesprechung mit dem Versuchsleiter am Sonntagabend. Also muss nach dem Aufwachen am Montag ihre subjektive Wahrscheinlichkeit für Kopf wie für Zahl gleich ein halb sein.

Allgemein gilt, dass der reine Zeitablauf subjektive Wahrscheinlichkeiten nicht verändern kann; darüber sind sich beide Seiten einig. Es gilt sogar verschärft das so genannte Reflexionsprinzip, das der niederländische Wissenschaftstheoretiker Bastiaan van Fraassen aufgestellt hat: Wenn für jeden zukünftigen Zeitpunkt eine subjektive Wahrscheinlichkeit für irgendein Ereignis dieselbe ist, dann hat sie diesen Wert bereits für die Gegenwart. Es kommt insbesondere nicht darauf an, wann genau die Münze geworfen wird; es muss nur vor dem Erweckungstermin am Dienstag sein. Der Versuchsleiter darf Dornröschen am Montag sogar nach ihrer Einschätzung für einen Wurf fragen, der noch gar nicht stattgefunden hat, ohne dass das etwas Wesentliches an der Situation ändert. Nur mit seiner Wortwahl muss er aufpassen: Aus einer Formulierung wie »Wie schätzt du die Chance dafür, dass die Münze Kopf zeigen wird?« kann Dornröschen erschließen, dass die Münze noch nicht gefallen ist; also muss es Montag sein, und diese Information ändert die subjektiven Wahrscheinlichkeiten.

Die Mathematiker haben sich um eine klare Aussage gedrückt, was eine Wahrscheinlichkeit ist

Das Reflexionsprinzip hängt allerdings an einer Voraussetzung: Es darf in der Zwischenzeit keine kognitive Beeinträchtigung (»cognitive mishap«) eingetreten sein. Dazu zählt insbesondere Vergessen. Was wird in einem Jahr meine subjektive Wahrscheinlichkeit dafür sein, dass es gestern bei mir zu Hause geregnet hat? Da ich das bis dahin längst vergessen haben werde, würde mir nichts anderes übrig bleiben, als die durchschnittliche Regenwahrscheinlichkeit für meinen Wohnort anzusetzen. Heute ist dieselbe subjektive Wahrscheinlichkeit gleich null; ich weiß nämlich noch genau, dass gestern kein Tropfen gefallen ist.

Drittler gegen Halbierer – wer hat nun Recht?

Die Vergessensdroge, die Dornröschen verabreicht wird, verursacht zweifellos eine kognitive Beeinträchtigung. Aber, so Lewis, diese findet erst nach der montäglichen Befragung statt. Also hat sie auf die Argumentation bis zum Montagmorgen keinen Einfluss.

Lewis ist von seiner Position so überzeugt, dass auch eine seltsame Konsequenz ihn nicht davon abbringt. Wie Elga klärt er Dornröschen nach dem Erwachen und der Befragung darüber auf, dass heute Montag ist. Das ist für sie in der Tat eine Information, die sie vorher nicht hatte, und damit ein Anlass, ihre Wahrscheinlichkeiten zu revidieren. Anwendung derselben Rechenregeln wie oben ergibt abermals, dass eine Wahrscheinlichkeit von ein Sechstel von Zahl nach Kopf wandert. Aber während bei Elga die Wahrscheinlichkeit für Kopf von ein Drittel auf ein halb ansteigt, erhöht sie sich bei Lewis von ein halb auf zwei Drittel, ein Ergebnis, das – vorsichtig ausgedrückt – der Intuition widerspricht.

Überzeugender wirkt seine Argumentation, wenn er Fälle konstruiert, in denen das Ergebnis des Münzwurfs bis zur Irrelevanz verfälscht wird. Nehmen wir an, Dornröschen wird bei dem Ergebnis Zahl nicht zweimal statt nur einmal geweckt, sondern eine Million Mal. Da sie nach wie vor ihre Erweckungen nicht voneinander unterscheiden kann, muss sie nach der Logik der Drittler davon ausgehen, dass ihre Chance, eine Montags-Kopf-Erweckung zu erleben, nur ein knappes Millionstel beträgt. Und selbst wenn die Münze so gezinkt wäre, dass sie in 999 von 1000 Fällen Kopf zeigt, würde das Dornröschens Montags-Kopf-Chance zwar um das Tausendfache erhöhen; aber das wäre dann immer noch nur ein mickriges Promille. Das will einem in der Tat nicht in den Kopf, dass eine objektiv vorhandene Wahrscheinlichkeitsverteilung durch die Merkwürdigkeiten des Experiments derart verbogen wird.

Nick Bostrom, Philosoph in Oxford, treibt das Gedankenspiel noch viel weiter ins Reich des Fantastischen. Für das Problem macht es keinen Unterschied, wenn der Experimentator die – faire – Münze überhaupt nicht wirft und stattdessen zwei perfekte Klone Dornröschens anfertigt. Man kann zur besseren Anknüpfung an das Ursprungsproblem das Original als »Montags-Kopfmädchen« bezeichnen und die beiden Kopien als »Montags-Zahlmädchen« und »Dienstags-Zahlmädchen«; aber das ist zweitrangig. Auch die Schlafpause mit Erweckung und Vergessensdroge erübrigt sich. Alle drei Prinzessinnen sind perfekt rationale Denkerinnen und vollständig informiert –

bis auf die eigene Identität: Keine von ihnen weiß, welches Exemplar sie ist. Der Versuchsleiter wählt nun eine von ihnen zufällig aus und fragt sie: »Mit welcher Wahrscheinlichkeit, glaubst du, bist du das Original?«

Da kann sie vernünftigerweise nur »ein Drittel« antworten – und wie oben auf »ein halb« wechseln, sowie sie informiert wird, dass sie ein Montagsmädchen ist. Und wenn es nicht nur zwei, sondern eine Million Kopien gibt, wird jede Befragte der Möglichkeit, sie selbst sei das Original, eine verschwindend geringe Wahrscheinlichkeit zuweisen – nur geringfügig größer als die Chance auf sechs Richtige im Lotto.

Oder man hängt der Vielweltentheorie an und setzt an die Stelle des Münzwurfs ein quantenmechanisches Experiment nach dem Muster von Schrödingers Katze. Dann hat man ein über jeden Zweifel erhabenes Zufallsereignis, in dessen Folge aus einer Welt zwei werden. In der Kopfwelt bleibt Dornröschen einzigartig, in der Zahlwelt wird sie N-fach vervielfältigt (oben gab es die Beispiele $N = 2$ und $N = 1000000$). Und jede der Damen wird die Wahrscheinlichkeit dafür, dass sie in der Kopfwelt lebt, als $1/(N + 1)$ einschätzen: einigermaßen unwahrscheinlich für $N = 2$ bis praktisch ausgeschlossen für $N = 1000000$.

Von Dornröschen zum anthropischen Prinzip

Das wirkt so weit widerspruchsfrei und scheint zu Gunsten der Drittler zu sprechen. Bostrom argumentiert allerdings weiter. Jede Kopie von Dornröschen kommt zu ihrer Einschätzung, indem sie gewissermaßen unterstellt, sie selbst sei nach dem Zufallsprinzip aus dem großen Kollektiv ausgewählt worden. Dem Indifferenzprinzip zufolge bleibt ihr nichts anderes übrig, wenn sie von den Mitgliedern des Kollektivs nichts weiter weiß, als dass sie dazugehört. Also wird sie sich mit großer oder gar erdrückender Wahrscheinlichkeit dem Teilkollektiv zugehörig fühlen, das die große beziehungsweise erdrückende Mehrheit bildet.

Genau dieses Denkmuster wendet Bostrom nun auf die Frage an, ob wir allein im Universum sind – womit er bei seinem Lieblingsthema ist, dem anthropischen Prinzip und seinen Folgerungen. An die Stelle der zahlreichen Dornröschen treten nunmehr alle Lebensformen, die das Weltall zu beobachten fähig sind und über so viel Bewusstsein verfügen, dass sie sich über Lebensformen auf anderen Planeten Gedanken machen. Bislang sind wir das einzige bekannte Mitglied dieses Kollektivs (woraus die Vertreter des anthropischen Prinzips sehr weitgehende Schlüsse ziehen); gleichwohl sollten wir uns nach dem Indifferenzprinzip bis zum Beweis des Gegenteils lediglich als ein typisches Exemplar betrachten. Mit ganz ähnlichen Überlegungen hatte der Astrophysiker J. Richard Gott aus Princeton bereits die voraussichtliche Restlebensdauer des Menschengeschlechts abgeschätzt (**Spektrum** September 1993, S. 30).

Bostrom führt seine Sciencefiction-Erzählung wie folgt weiter: Angenommen, die kosmologischen Forschungen seien so weit fortgeschritten, dass nur zwei Hypothesen zur Auswahl stehen. A: Das Universum ist endlich, mit 10^{12} Planeten, die Leben mit Bewusstsein beherbergen können. B: wie A, nur sind es 10^{24} solcher Planeten. Ein groß angelegtes Messprojekt soll die Entscheidung zwischen den beiden Alternativen bringen.

Da kommt der Philosoph aus der Schule der Drittler und sagt folgendes: »Ihr könnt euch den ganzen Aufwand sparen. Ich weiß schon jetzt, dass Hypothese B mit so gut wie absoluter Sicherheit zutrifft. Die Chancen stehen 10^{12} zu 1« – was um Größenordnungen besser wäre als die Sicherheit, die man aus einer physikalischen Messung gewinnen kann. Zum Beweis bringt er das Dornröschen-Argument: Ich, der Philosoph, muss so denken, als wäre ich aus allen meinesgleichen, in echten wie in hypothetischen Universen, durch Zufall ausgewählt worden. In der B-Welt gibt es 10^{12}-mal so viele Lebenswelten mit Bewusstsein wie in der A-Welt, also spricht alle Wahrscheinlichkeit dafür, dass wir in der B-Welt leben.

Da kratzen sich die Astrophysiker etwas hilflos am Kopf und fahren mit ihrer Arbeit fort. In der Tat führt diese Weiterführung des Drittler-Arguments auf absurde Konsequenzen, was Bostrom zum Anlass nimmt, das ganze Argument zu verwerfen und eine recht eigenwillige Mischung aus Halbierer- und Drittler-Denkweise vorzuschlagen.

Ich persönlich bin inzwischen ein überzeugter Drittler. Dass Bostrom deren Konzept nach einigen Modifikationen ad absurdum führt, kann mich davon nicht abbringen; ich lokalisiere die Quelle der Absurdität nicht in der Grundidee, sondern in Bostroms abenteuerlichen Zutaten.

Vielmehr sehe ich einen entscheidenden Denkfehler in der Argumentation der Halbierer, und zwar da, wo sie behaupten, Dornröschen habe nach der Montagserweckung keinen Grund, ihre subjektiven Wahrscheinlichkeiten zu revidieren; die kognitive Beeinträchtigung, die das Reflexionsprinzip aushebeln würde, habe ja noch nicht stattgefunden. Das stimmt zwar, ist aber aus Dornröschens Perspektive irrelevant, denn sie kann es nicht wissen. Insbesondere muss sie mit der Möglichkeit rechnen, dass es Dienstag ist und sie die kognitive Beeinträchtigung bereits erlitten hat.

Um das Reflexionsprinzip außer Kraft zu setzen, braucht es also nicht unbedingt eine kognitive Beeinträchtigung; es genügt eine hypothetische, sofern das Subjekt sie rationalerweise fürchten muss. Der Gedanke ist in der Tat etwas gewöhnungsbedürftig. ◂

QUELLEN

Bostrom, N.: Sleeping beauty and self-location: A hybrid model. Synthese 157, 2007

Elga, A.: Self-locating Belief and the Sleeping Beauty Problem. Analysis 60, 2000

Lewis, D.: Sleeping Beauty: reply to Elga. Analysis 61, 2001

Rosenthal, J.S.: A mathematical analysis of the Sleeping Beauty problem. The Mathematical Intelligencer 31 (3), 2009

Winkler, P.: The sleeping beauty controversy. The American Mathematical Monthly 124, 2017



FREISTETTERS FORMELWELT

IST DIE EXISTENZ GOTTES LOGISCH?

Der Versuchung, den Gottesglauben mathematisch zu beweisen, konnten viele nicht widerstehen. Doch ihre Bemühungen sind zum Scheitern verurteilt.

Florian Freistetter ist Astronom, Autor und Wissenschaftskabarettist bei den »Science Busters«.

spektrum.de/artikel/1675662

»Existenz Gottes mathematisch bewiesen«, verkündeten viele Schlagzeilen im Jahr 2014. Denn Christoph Benzmüller von der FU Berlin und Bruno Woltzenlogel Paleo, damals an der TU Wien, hatten eine 1941 erschienene Arbeit des berühmten Logikers Kurt Gödel mit neuen Computermethoden überprüft und ihre Gültigkeit bewiesen. Das Resultat war diese Formel:

$$\Box \; \exists x \; G(x)$$

In normale Sprache übersetzt bedeuten die mathematischen Symbole »Ein göttliches Wesen existiert notwendigerweise«. Ist damit der ewige Streit zwischen Wissenschaft und Religion beendet? Müssen Atheistinnen und Atheisten auf der ganzen Welt die Existenz Gottes anerkennen? Natürlich nicht – denn Kurt Gödel wollte mit seiner Arbeit niemanden missionieren. Stattdessen beschäftigte er sich mit dem, was Theologen und Philosophen als ontologischen Gottesbeweis bezeichnen. Im 11. Jahrhundert versuchte Anselm von Canterbury die Existenz Gottes aus rein logischen Argumenten abzuleiten, so wie auch der französische Mathematiker René Descartes ein paar Jahrhunderte später. Doch kaum jemand kannte sich besser mit Logik aus als Kurt Gödel.

1931 veröffentlichte er seine berühmte Arbeit »Über formal unentscheidbare Sätze der Principia Mathematica und verwandter Systeme I«, in der er bewies, dass es in jedem ausreichend mächtigen System widerspruchsfreier Axiome immer Aussagen gibt, die sich weder beweisen noch widerlegen lassen. Das heißt, die Mathematik ist nicht vollständig und enthält stets Sätze, über die man nicht entscheiden kann, ob sie gültig sind oder nicht. Dieser »Unvollständigkeitssatz« erschütterte die mathematische Welt. Wenige Jahre zuvor hatte David Hilbert das später nach ihm benannte Programm vorgestellt, das unter anderem beweisen sollte, dass die Mathematik widerspruchsfrei ist. Dem bereitete der Unvollständigkeitssatz ein unerwartetes Ende.

Gödels Interesse an der Logik erstreckte sich aber auch auf andere Gebiete. Mit seiner Arbeit über den ontologischen Gottesbeweis wollte er zeigen, dass man derartige theologische Überlegungen nicht nur in der Sprache des Mittelalters, sondern auch auf eine Art und Weise führen kann, die den modernen Ansprüchen der Logik gerecht wird. Also formalisierte er das, was Anselm von Canterbury fast 800 Jahre zuvor aufgeschrieben hatte. Die Existenz Gottes bewies er damit nicht. Ebenso wenig wie die beiden Mathematiker im Jahr 2014, die nur demonstrieren wollten, dass sich diese Art der logischen Argumentation in eine für Computer verständliche Sprache übersetzen lässt.

Wie sie zeigen konnten, führt Gödels Kette an Definitionen und Annahmen tatsächlich zur Schlussfolgerung der Existenz eines göttlichen Wesens. Diese Annahmen sind der entscheidende Punkt. »Definition 1« in Gödels Beweis lautet beispielsweise: »Ein Wesen ist göttlich, wenn es alle positiven Eigenschaften besitzt.« Dem kann man zustimmen oder auch nicht. Vor allem lässt sich darüber diskutieren, was positive Eigenschaften sind. Ebenso steht es um andere Annahmen, die Gödel trifft. Das erste Axiom in seiner logischen Kette ist zum Beispiel: »Eine Eigenschaft ist entweder positiv oder negativ.« Mir fallen allerdings jede Menge Eigenschaften ein, die je nach Kontext und Situation sowohl das eine als auch das andere sein können.

Selbst wenn die Logik des Gottesbeweises korrekt ist, ist das Ergebnis trotzdem nur so viel wert wie die Annahmen, auf denen es basiert. Um die Existenz Gottes beweisen zu können, muss man davon ausgehen, dass sich Begriffe wie »göttlich« eindeutig definieren lassen. Anders ausgedrückt: Mit Mathematik lässt sich nur dann die Existenz Gottes »beweisen«, wenn man schon an die Existenz Gottes glaubt.





Buntspechte sind in Eurasien weit verbreitet. Ihre Nahrung – sowohl Pflanzen als auch Tiere – suchen sie vor allem in Baumkronen.

Volker Zahner, Norbert Wimmer
SPECHTE & CO.
Sympathische Hüter heimischer Wälder
Aula, Wiebelsheim 2019
168 S., € 19,95

ORNITHOLOGIE

ZIMMERMÄNNER DES WALDES

Spechte gehören zu den bekanntesten und beliebtesten Vögeln unserer heimischen Wälder. Dieses Buch liefert Einblicke in ihre besondere Lebensweise.

Lautes Trommeln dringt durch den Wald. Unüberhörbar markiert der Schwarzspecht sein Revier und versucht, in der Nähe befindliche Weibchen von seinen Qualitäten zu über-

zeugen. Dabei wählt der Vogel seine Bühne mit Bedacht: Tote Äste oder hohle Bäume bieten einen effektiven Resonanzboden für die akustische Darbietung. Bis zu 300-mal am Tag erklingen die dumpf tönenden Wirbel, die jeweils ungefähr drei Sekunden andauern.

Der Schwarzspecht *(Dryocopus martius)* gehört zur großen Familie der Spechte (Picidae), die mehr als 200 Arten umfasst. Als »sympathische Hüter heimischer Wälder« werden sie in diesem Buch vorgestellt, das der Zoologe Volker Zahner von der Hochschule Weihenstephan-Triesdorf und der Fotograf Norbert Wimmer verfasst haben. Die Leser erfahren darin, welch wichtige Rolle die Vögel für das Ökosystem Wald spielen. Auch wenn Spechte hier nur einen verschwindend kleinen Bruchteil zur Gesamtbiomasse beitragen, nehmen sie eine Schlüsselrolle ein. Allem voran mindert ihr Höhlenbau die Wohnungsnot von Nachmietern wie Hohltauben, Haselmäusen oder Siebenschläfern. Auch etliche Singvögel nutzen die windgeschützten Nischen, die nach unermüdlicher Holzbearbeitung zurückbleiben, als Unterschlupf. Und indem Spechte von vielen Baumstämmen die Borke lösen, erleichtern sie anderen Arten den Zugang zu Insekten.

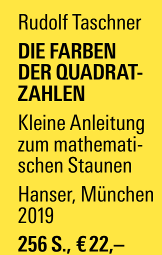
Anschaulich beschreibt das Autorenduo die bei der Nahrungssuche eingesetzten Hacktechniken der Spechte und erklärt, wie spezifische Anpassungen im Skelett dafür sorgen, dass die Tiere auch nach stundenlanger Kopfarbeit keine Gehirnerschütterung erleiden. Zwei längere Kapitel widmen sich der Baumhöhle sowie dem Familienleben der Vögel. Tipps zur eigenen Beobachtung runden den ersten Teil des Büchleins ab.

Im zweiten Teil stellen Zahner und Wimmer alle in Deutschland heimischen Spechtarten vor. Karten zum jeweiligen Verbreitungsgebiet wie auch kurze Steckbriefe erleichtern den Vergleich. Ein besonderes Schmankerl: Mittels Audiodateien, die sich von der Verlagswebsite herunterladen lassen, können die Leser dem artspezifischen Rufen und Trommeln auch lauschen.

Das Buch richtet sich an Laien, wirkt sprachlich aber mitunter ein wenig holprig. Eingestreute Zitate, deren Quelle sich erst im Literaturverzeichnis erschließt, verwirren eher, statt zu helfen. Etliche Wiederholungen trüben den Lesegenuss. Immer wieder tauchen Fachbegriffe auf, zu denen das Werk keine Erklärung liefert, etwa »Megaherbivorentheorie«, »boreal«, »hudern« oder »home range«. Manchmal geht dabei auch etwas schief – so verwandelt sich die Biozönose, also die Lebensgemeinschaft, in eine »Biozinöse«. Der eine oder andere Satzfehler wäre ebenfalls vermeidbar gewesen.

Trotz dieser kleinen Mängel lässt sich der Band allen empfehlen, die mehr über die faszinierenden Waldvögel erfahren möchten. Vor allem die zahlreichen wunderschönen Fotos werden jeden Spechtliebhaber erfreuen.

Der Rezensent Andreas Jahn ist promovierter Biologe und **Spektrum**-Redakteur.



Rudolf Taschner
DIE FARBEN DER QUADRATZAHLEN
Kleine Anleitung zum mathematischen Staunen
Hanser, München 2019
256 S., € 22,–



MATHEMATIK **AUS DEM VOLLEN GESCHÖPFT**

Der Mathematiker Rudolf Taschner beweist einmal mehr, dass er ein großes Talent dafür besitzt, Geschichten über sein Fach zu erzählen.

Rudolf Taschner ist Professor für Mathematik an der Technischen Universität Wien, Österreichs Wissenschaftler des Jahres 2004 und Volksbildungspreisträger der Stadt Wien. Seit November 2017 betätigt er sich zudem als ÖVP-Abgeordneter im österreichischen Parlament und tritt als Experte für Bildungsfragen in Erscheinung. Mit großer Regelmäßigkeit veröffentlicht er Bücher, in denen er erfolgreich das Interesse seiner Leserinnen und Leser für Mathematik weckt. **Spektrum** hat mehrere dieser Werke rezensiert, zuletzt »Vom 1x1 zum Glück« (2017).

Das Buch fühlt sich eher dem Feuilletonistischen verpflichtet

Sein neuer Band untergliedert sich in fünf Abschnitte, deren Überschriften das aufgreifen, was der Verlag als »fulminante Reise entlang der Grenze von Mathematik und Philosophie« anpreist. Im Vorwort kündigt der Autor an, dass er »von Überraschendem und Unerwartetem« berichten wird, und tatsächlich bekommen die Leser zahlreiche verblüffende Ergebnisse aus der Welt der Mathematik geboten.

Auf statistische und wahrscheinlichkeitstheoretische Paradoxa folgen erstaunliche Erkenntnisse über das Unendliche sowie im dritten Abschnitt diverse geklärte und ungeklärte Fragen über Primzahlen. Das letzte Kapitel widmet der Autor dem Banach-Tarski-Paradoxon, in dem es darum geht, dass das mathematische Modell des Raums als Punktmenge gewisse Aspekte hat, die sich in der physikalischen Realität nicht wiederfinden.

Was es mit den Farben der Quadratzahlen auf sich hat, verrät der Autor erst im vierten Kapitel. Das erscheint sehr spät, schließlich ist mit diesem Thema das gesamte Buch überschrieben. Um dorthin zu gelangen, spannt er über mehr als 40 Seiten hinweg einen gewaltigen Bogen – beginnend mit der Frage, wie groß man drei quadratische Pinienpflanzungen anlegen müsste, damit vom Mond aus erkennbar wäre, dass es sich um eine Pythagorasfigur handelt. Anschließend verrät er, wie schon Steinzeitmenschen hätten überprüfen können, dass ein in den Boden gerammter Stab tatsächlich senkrecht steht, und wie sie ihn etwa

als Sonnenuhr hätten nutzen können. Es folgt ein Beweis des Satzes von Pythagoras, der allzu wortreich ausfällt, schließlich ist die Beweisfigur eigentlich selbstredend. Weiter geht der Autor auf pythagoreische Zahlentripel ein und erläutert, welche Berechnungsmethode Euklid in seinen »Elementen« angab, um solche Tripel zu finden. Über diverse zusätzliche Stationen – darunter die Irrationalität der Wurzel aus 2, die Weltbilder berühmter Gelehrter, Galileis Tuschzeichnungen von Mondkratern, das newtonsche Gravitationsgesetz, minimale Abstandsquadrate, Linsenfehler – stößt er endlich zu den fraunhoferschen Spektrallinien vor und somit zur Erklärung, was die Quadratzahlen mit den Farben zu tun haben. Demnach entdeckte der Schweizer Mathematiklehrer Balmer quadratische Zahlenverhältnisse bei den Frequenzen dieser Spektrallinien und damit eine geniale Begründung für ihre physikalische Erscheinung.

Taschners große Stärke ist es, Geschichten zu erzählen, was dieses Buch erneut bestätigt. Doch hiermit verbunden ist immer die Gefahr, dass er sich in seinen Erzählungen verliert, wie die obige Aufzählung vielleicht deutlich macht. Sich dessen wohl bewusst seiend, weist er schon im Vorwort darauf hin, sein Buch sei ein Essay – eine Schrift also, die eher »dem Feuilletonistischen verpflichtet« ist. Gleichwohl behandelt er konkrete mathematische Probleme und Theorien, in deren Zusammenhang auch Terme und Gleichungen unvermeidlich vorkommen. Den Charakter des allzu Formalen versucht Taschner durch verbale Beschreibungen zu umgehen, was mitunter zu vermeidbaren Wiederholungen führt. Er selbst räumt an einer Stelle ein: »Eigentlich ist dies alles sehr einfach und bildhaft viel schneller zu begreifen als mit umständlichen wortreichen Erklärungen.« Da sei dann die Frage erlaubt: Warum die zahlreichen Worte?

Das Buch enthält eine Reihe von Tabellen und Grafiken, die das Verständnis des Texts fördern. Ärgerlich ist nur, dass man gelegentlich hin- und herblättern muss, weil zueinander gehörende Texte und Grafiken auf der Vorder- und Rückseite eines Blatts stehen. Das hätte sich gestalterisch sicher anders lösen lassen.

Dem Autor kann man gewiss nicht vorwerfen, ein langweiliges Buch verfasst zu haben. Und es ist fraglos erstaunlich, wer und was alles in dem Werk vorkommt. Viele Persönlichkeiten treten freilich nur in einem einzigen Satz auf, und man fragt sich: wofür? Warum beispielsweise war es für den Autor so wichtig zu erwähnen, dass Abraham de Moivre es nicht schaffte, das Basler Problem zu lösen? Welche Belege hat er dafür, dass jener bedauernswerte hugenottische Emigrant, der in London ums Überleben kämpfen musste, Newton »hündisch« ergeben war, und wieso musste er das in dem Zusammenhang unbedingt anführen?

Das umfangreiche Register am Ende des Buches ist gleichwohl ein Beleg für den großen Kenntnisreichtum Taschners, der stets aus dem Vollen schöpfen kann und als Vortragender ebenso wie als Buchautor seine Zuhörer- beziehungsweise Leserschaft zu fesseln vermag.

Der Rezensent Heinz Klaus Strick ist Mathematiker und ehemaliger Leiter des Landrat-Lucas-Gymnasiums in Leverkusen-Opladen.

MEDIZIN
AUS DEM LEBEN EINES ARZTES

Ein Hals-Nasen-Ohren-Arzt blickt auf seine Karriere zurück und schildert bewegende Patientenschicksale.

Das Berufsleben des Hals-Nasen-Ohren-Arztes Rainer Jund ist voller Kontraste: Freude und Trauer, Komplexität und Banalität, erfolgreiche Rettung und Versagen liegen dicht beieinander. In diesem Buch stellt er all das anhand von Patientengeschichten dar. Jund berichtet von dramatischen Operationen, bei denen er es in letzter Sekunde schaffte, eine lebensbedrohliche Blutung zu stoppen – aber auch von endlos wirkenden Tagen im Ambulatorium, an denen er ungeduldigen Patienten die Ohren reinigte oder ihnen in die Nase schaute. Die episodischen Berichte reihen sich lose aneinander, beginnend mit Junds erstem Präparationskurs im Medizinstudium über Ausbildungsstationen in der Neurochirurgie und Onkologie bis hin zu seiner Zeit als Oberarzt an der HNO-Universitätsklinik München Großhadern.

Rainer Jund
TAGE IN WEISS
Piper, München 2019
240 S., € 20,–



Die meisten geschilderten Begebenheiten liegen mehrere Jahrzehnte zurück – 2004 hat Jund die Universitätsklinik verlassen und eine eigene Praxis übernommen. Doch seine Erzählungen sind so lebendig und detailliert, dass man beinahe das Gefühl hat, unmittelbar dabei zu sein. Jund nimmt sich viele literarische Freiheiten und malt nicht nur eigene Emotionen, Gedanken und Sinneswahrnehmungen aus, sondern schildert auch, was einem sterbenden Patienten kurz vor dem Tod durch den Kopf geht. Immer wieder streut er dabei existenzielle Überlegungen ein: Was ist uns wichtig im Leben? Nach welcher Art von Anerkennung streben wir? Welche Ziele verfolgen wir? Was erfüllt unser Leben mit Sinn?

Jund beschreibt keine Fälle, sondern Schicksale. Seine Patienten sind für ihn nicht bloß Diagnosen, sondern Menschen mit Sorgen und Hoffnungen, Stärken und Schwächen. Er macht keinen Hehl daraus, welche ihm sympathisch waren und welche nicht. Doch auch jenen, die er als unverschämt, arrogant oder ideologisch verblendet charakterisiert, nähert er sich mit demütiger Zurückhaltung und unterlässt es, sie zu verurteilen.

Viele der Geschichten im Buch enden tragisch. Manche lassen die

Leser ebenso ratlos zurück, wie sich der Autor gefühlt haben mag, als er beispielsweise trotz aller Bemühungen einen Patienten nicht retten konnte. Hier zeigt sich, wie zerbrechlich das Leben ist. Ein einziges geplatztes Blutgefäß kann von jetzt auf gleich alles beenden, was bis dahin schön oder wichtig war. Krebszellen können einen anscheinend gesunden Körper zerfressen und erst bemerkt werden, wenn es schon zu spät ist. Doch gerade der Gedanke an die Vergänglichkeit regt an, darüber zu reflektieren, was im eigenen Leben wirklich bedeutsam ist. Das Buch gibt einen Anstoß dazu.

Jedes der tragischen oder auch glücklichen Patientenschicksale böte den Stoff für einen gesonderten Roman. Doch in Junds Buch stehen sie unmittelbar neben Beschreibungen von Krankenhausbanalitäten, Bürotagen und Aktenbergen. Genau das vermittelt einen tiefen Eindruck vom Alltag eines Arztes, der von solchen Kontrasten geprägt ist. Auf einige Patienten wirft Jund nur ein flüchtiges Schlaglicht, etwa bei einer Begegnung im Ambulatorium, die mehr Fragen aufwirft, als sie beantwortet. Selbst das spiegelt einen Aspekt der heutigen Medizin: Krankenhausärzte sehen viele Patienten nur kurz, können kaum deren Krankengeschichte und schon gar nicht deren Leben erfassen. Und doch bekommen sie eine Ahnung, dass sich auch hier romanfüllende Geschichten verbergen.

Nach etlichen Erzählungen voller Tod, Trauer, Verzweiflung und Sinnlosigkeit schließt Jund das Buch mit einer ganz persönlichen Geschichte: der Geburt seines Sohnes. Gerade in diesem Kontext wirkt das Wunder des Lebens umso größer. Die zuvor aufgeworfene Frage nach dem Sinn des Daseins beantwortet auch dieses Kapitel nicht; danach muss jeder Leser für sich suchen. Doch zurück bleibt neben Melancholie und Nachdenklichkeit die Gewissheit, dass es Hoffnung gibt und jedes Leben in seiner Verletzlichkeit unendlich wertvoll ist.

Die Rezensentin Elena Bernard ist Wissenschaftsjournalistin in Dortmund.

Winfried Wolf
MIT DEM ELEKTROAUTO IN DIE SACKGASSE
Warum E-Mobilität den Klimawandel beschleunigt
Promedia, Wien 2019
216 S., € 17,90



MOBILITÄT
ABRECHNUNG MIT DER AUTOMOBILINDUSTRIE

Ein Verkehrsexperte plädiert dafür, vom derzeitigen Trend zum E-Auto abzukehren. Stattdessen sollten wir öfter öffentliche Verkehrsmittel nutzen.

Die Verkehrswende gehört zu den Themen, die in Deutschland die Gemüter erhitzen. Das neue Sachbuch von Winfried Wolf mischt sich in diese Debatte ein. Wolf ist unter anderem Mitglied im wissenschaftlichen Beirat von »Attac«, Sprecher des Bündnisses »Bahn für Alle«, Chefredakteur von »Lunapark 21 – Zeitschrift zur Kritik der globalen Ökonomie« und war verkehrspolitischer Sprecher der PDS (heute »Die Linke«). Auf den ersten Blick mag es überraschen, dass er sich in dem Werk gegen die vermeintlich klimafreundliche Elektromobilität ausspricht. Doch ist er trotz des Hypes um das Elektroauto beileibe nicht der einzige Kritiker, der fragt, wie gut es um die Ökobilanz des Elektroautos nun wirklich bestellt ist.

Denn ein akkubetriebenes Automobil emittiert vielleicht während der Fahrt kein Kohlenstoffdioxid, seine Produktion setzt jedoch viel mehr davon frei als die Herstellung eines Verbrenners. Jene Hypothek muss das Elektroauto im Lauf seines Lebens erst einmal abfahren. Und die derzeitigen Fördermethoden für Akku-Rohstoffe wie Lithium oder Kobalt sind nicht eben umweltfreundlich.

Wolf geht detailliert auf diese und weitere Aspekte der Debatte ein. Dabei vertritt er durchaus kontroverse Thesen. Zum Beispiel geht er davon aus, dass neue Trends und Reformdebatten rund um die Mobilität im Wesentlichen von den Kraftfahrzeugherstellern bestimmt werden, sobald diese in wirtschaftlichen Schwierigkeiten stecken. Er belegt das eindrucksvoll mit Zitaten und Statistiken. Womit wir freilich bei einem Problem des Buchs wären: In einigen Kapiteln werden die Leser von Statistiken regelrecht erschlagen; zudem stören diese immer wieder den Lesefluss, auch wenn der Rest des Buchs recht flüssig geschrieben ist. Weiterhin fallen sofort einige Schreibfehler ins Auge, die in einem Sachbuch nicht passieren sollten – etwa »1994–1985« statt »1974–1985«.

Interessant ist, dass der Autor sich nicht nur auf Deutschland beschränkt, sondern zudem auf China als größten Absatzmarkt eingeht und die Versuche der Volksrepublik beleuchtet, mittels E-Mobilität zu einem führenden Akteur im Automobilsektor zu werden. Wolf belegt schlüssig seine These, dass die derzeitige Entwicklung der Elektromobilität in eine Sackgasse führt – obgleich er gegen Ende des Buchs ins Polemische abgleitet. Seine Kritik an Elon Musk kann man gerechtfertigt finden, der Ton ist einem Sachbuch aber nicht angemessen.

Die Alternativvorschläge des Autors zur E-Mobilität enttäuschen. Der Ausbau des öffentlichen Verkehrsnetzes, kostenlose öffentliche Verkehrsmittel, die bevorzugte Fortbewegung per Rad oder pedes, die Verteuerung von Flügen und Autofahrten sind sicherlich keine falschen Maßnahmen, doch eher trivial. Was dem Buch völlig fehlt, aber wünschenswert wäre, ist eine Diskussion anderer Antriebssysteme. Die Erzeugung künstlicher Kraftstoffe mit Hilfe alternativer Energien etwa, Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnik diskutiert Wolf überhaupt nicht.

Dennoch bietet das Buch interessante Einblicke in die Lobbyarbeit und Marktmacht der Autokonzerne. Wer die aktuellen Debatten zur Verkehrswende und zur Elektromobilität aus allgemeinem Interesse verfolgt, für den ist das Werk sicherlich ergiebig. Wer sich eher für technische Aspekte

und alternative Antriebssysteme interessiert, ist mit einem Fachbuch besser bedient.

Der Rezensent Stefan-Johannes Reich ist Physiker und absolviert ein redaktionelles Praktikum bei **Spektrum** der Wissenschaft.

GESCHICHTE
STÄDTEBAU IM IMPERIUM

Am Beispiel einer Fantasiestadt zeigt ein Architekt und Zeichner detailliert, wie römische Siedlungen entstanden.

Auf Befehl des Kaisers Augustus und mit Zustimmung des Senats und der Omenspriester entsteht im Norden Italiens eine neue Stadt: Verbonia Augusta. Die Bauherren legen einen quadratischen Plan an; Vermesser, Ingenieure und Architekten reisen an den Bauplatz – ebenso wie zahlreiche Soldaten, die Straßen schaffen, öffentliche Gebäude errichten und mit ihren Familien die ersten Einwohner stellen. Neben Wohnblöcken, den »insulae«, sowie Verwaltungsgebäuden entstehen Theater, Thermen, öffentliche Toiletten und ein Aquädukt für die Wasserversorgung. Das Ergebnis all dessen ist eine typische römische Stadt.

Nun hat es Verbonia nie gegeben, aber der Grundriss, die Baugeschichte und die Einwohner dieser quasi idealtypischen Fantasiestadt stehen beispielhaft für etliche Stadtneugründungen im gesamten Römischen Reich. Viele jener am Reißbrett entworfenen Siedlungen entwickelten sich zu blühenden Metropolen, deren archäologische Überreste bis heute zu besichtigen sind – und von denen nicht wenige noch anderthalb Jahrtausende nach dem Ende des Imperium Romanum als bewohnte Städte existieren. Der Architekt und technische Zeichner David Macaulay hat etliche populärwissenschaftliche Bücher über antike Architektur geschrieben und illustriert. In diesem großformatigen Werk über die Fantasiestadt Verbonia erläutert er Schritt für Schritt, wie die Siedlungsplanung des Römischen Reichs funktionierte. Sowohl die kultischen, verwaltungstechnischen und architektonischen Vorbereitungen als auch die praktische Umsetzung des Städtebaus erklärt der Autor historisch fundiert und in verständlicher, klarer Sprache. Er verwendet und übersetzt die im Römischen Reich üblichen Begriffe für einschlägige technische Geräte und soziale Phänomene, setzt Fachwörter aber sonst nur sparsam ein.

Was den Band so besonders macht, sind die Zeichnungen, die jeden beschriebenen Aspekt des römischen Städtebaus illustrieren. Querschnitte, Grundrisse und Ansichten, die technische Abläufe erläutern, wechseln sich mit Darstellungen der Fantasiestadt und ihrer Erbauer ab. Die Illustrationen sind nicht koloriert, sondern im Stil von Bleistiftzeichnungen schwarz-weiß gehalten und wirken dennoch lebendig. Das Werk enthält überdies acht Seiten mit Skizzen des Autors und seinen Erinnerungen an die Entstehung des Bands, der im Original erstmals 1974 erschien.

Das Buch ist ebenso kurzweilig zu lesen wie informativ. Die Illustrationen dienen nicht nur dem Verständnis, sondern sind auch überaus hübsch anzusehen. Für Menschen, die sich im Urlaub oder zu Hause schon einmal gefragt haben, woher die römerzeitlichen Ruinen stammen, ist dieser Band ein guter Einstieg. Er eignet sich für interessierte Laien jeden Alters.

Die Rezensentin Luise Loges arbeitet als Wissenschaftsjournalistin sowie Übersetzerin und promoviert derzeit im Fach Vorderasiatische Archäologie in Glasgow.

David Maculay
EINE STADT NACH PLAN
So bauten die Alten Römer
Nünnerich-Asmus, Oppenheim 2019
120 S., € 20,–



PHYSIK
ANREGENDE KNOBELEIEN

Dieses preiswerte Werk präsentiert unterhaltsame physikalische Kopfnüsse – auch, wenn sie nicht immer ganz neu sind.

Kann man eine unters Sofa gekullerte Garnrolle am Faden hervorziehen, oder rollt sie sich bei dem Versuch nur ab? Und wenn aus einem Boot heraus eine Münze in einen See fällt, steigt dann der Wasserspiegel oder sinkt er? Solche kleinen Knobeleien präsentiert Heinrich Hemme, der an der FH Aachen hauptberuflich Physik lehrt, in seinem Buch. Insgesamt 100 Rätsel gilt es zu lösen. Kann man eines nicht knacken, blättert man in den hinteren Buchteil, wo die Lösungen und ihre Erklärungen zu finden sind.

Der Autor bemüht sich, jedes Rätsel in eine kleine Geschichte zu packen. Das Missgeschick mit der Münze passiert also einem Johnny, der mit einem knallroten Schlauchboot über einen See fährt. In diesem und den meisten anderen Fällen kommt es auf die ausschmückenden Details aber nicht an, sie sollen nur zum Schmökern verführen. Hemme will sein Werk auf jene Weise von Physiklehrbüchern abheben, die oft gähnend langweilig seien.

Heinrich Hemme
100 PHYSIKALISCHE KOPFNÜSSE
Anaconda, Köln 2019
192 S., € 5,–

Natürlich gibt es schon viele ähnliche Werke, und man fragt sich, was einen zum Kauf dieses Bands animieren soll. Die Aufmachung ist es sicherlich nicht, denn er erweist sich als etwas lieblos gestaltet. Die Skizzen, die zu manchen Aufgaben gehören, sind häufig auf das Wesentliche reduziert und erinnern so doch wieder an ein Physiklehrbuch. Farbige oder gar hübsche Illustrationen fehlen durchweg. Viele Rätsel erscheinen auch einfach nur in knapper Textform.

Wer sich trotzdem, vielleicht des günstigen Preises wegen, für den Band entscheidet, wird möglicherweise abermals enttäuscht, denn etliche Kopfnüsse sind alte Hüte. Zum Beispiel die Frage, in welche Richtung man in einem strömenden Fluss schwimmen muss, um auf schnellstem Weg zum Ufer zu gelangen. Andere Aufgaben hingegen sind durchaus auch in universitären Physiklehrbüchern zu finden, etwa der Widerstandswürfel: Zwölf gleiche elektrische Widerstände bilden die Kanten eines Würfels. Wie groß ist der Widerstand des Gebildes von einer Ecke zur diagonal gegenüberliegenden?

Interessant sind natürlich jene Fälle, in denen man durch Nachdenken eine elegante Lösung finden kann. Im Fall des Widerstandswürfels gibt es tatsächlich einen solchen Kniff. Aber für die Garnrolle unter dem Sofa gilt das nicht: Hier muss man über Kräfte und Drehachsen sinnieren. Wieder andere Kopfnüsse verdienen den Namen nicht, da man unbedingt Stift und Papier zu ihrer Lösung benötigt und mit reinem Nachdenken keine Chance hat, was der Intention des Werks widerspricht. Wer möchte schon ein Buch am Schreibtisch lesen?

Und dann gibt es noch Rätsel, die absichtlich zu täuschen versuchen. Wann beispielsweise erreicht ein Boot, das sich »mit konstant einem Knoten pro Stunde aufmacht«, einen 450 Seemeilen entfernten Hafen? Hier sollen die Rätselnden erkennen, dass ein Knoten pro Stunde eine Beschleunigungs- und keine Geschwindigkeitsangabe ist. Eine gleichmäßig beschleunigte Bewegung ist für eine Seefahrt aber natürlich vollkommen unrealistisch. Außerdem versucht der Text dadurch abzulenken, dass die Abfahrt »am vorletzten Februartag des Jahres 2000« erfolgen soll – man also erst einmal prüfen muss, ob das Jahr 2000 ein Schaltjahr war. Unterm Strich ist das eine etwas doofe Knobelei, die keinen Scharfsinn, sondern Aufmerksamkeit erfordert.

Hemmes Buch wird sicher nicht jene erreichen, die Physik bereits in der Schule vermieden haben. Aber es gibt natürlich Leser und Leserinnen, die für entsprechende Rätsel schwärmen und denen Aufmachung und Ausschmückung egal sind. Auch wenn sich viele Kopfnüsse als betagt erweisen, ein paar neue dürften für jeden dabei sein. Bei einem Preis von fünf Cent pro Knobelei gibt es keinen wirklich guten Grund, Interessierten vom Kauf abzuraten.

Der Rezensent Stefan Gillessen ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik.

ANTIWISSENSCHAFT
KAMPF GEGEN DIE FAKTEN

Ein Physiker behandelt skurrile Verschwörungstheorien, übersieht dabei aber das weit größere Problem der aktuell grassierenden Wissenschaftsfeindlichkeit.

Kürzlich feierten die Medien das 50. Jubiläum der ersten Mondlandung und zeigten mehrfach den legendären Fußabdruck von Neil Armstrong auf dem Erdtrabanten. Leider ist nicht nur diese großartige Kollektivleistung mehrere Jahrzehnte alt, sondern auch der Verschwörungsmythos, der sich um sie rankt. Er besagt, dass noch nie ein Mensch den Mond betreten habe und der Mondspaziergang in einem irdischen Filmstudio inszeniert worden sei. Man kann das entweder mit einem Achselzucken quittieren – oder sich darauf einlassen, es zu widerlegen.

Letzteres tut Holm Gero Hümmler im vorliegenden Buch. Der Physiker hat sich schon früher kritisch mit Esoterik auseinandergesetzt und befasst sich in seinem neuen Werk mit Verschwörungstheorien à la »Mondlandung im Filmatelier«. Mit Fleiß und Engelsgeduld zerlegt er ein

Argument nach dem anderen, bis auch dem Letzten klar werden muss: Für den Mythos spricht gar nichts.

Diese Arbeit macht sich Hümmler noch in fünf weiteren Fällen. Er widmet sich beispielsweise der Behauptung, den Einsturz des World Trade Center am 11. September 2001 hätten nicht Flugzeuge verursacht, die von Terroristen entführt und gegen die Türme gelenkt wurden, sondern Sprengsätze, die von geheimnisvoller Hand gelegt worden seien. Der Autor setzt sich gründlich mit den Behauptungen der so genannten Truther auseinander, die meinen, die Wahrheit (truth) über den Einsturz der Twin Towers gepachtet zu haben, und seziert sie faktenbasiert.

Abstruse Mythen ranken sich um eine Forschungsanlage namens HAARP (High Frequency Active Auroral Research Program), die vor Jahrzehnten in Alaska errichtet wurde. Sie umfasst ein Feld von 180 lotrechten Funkantennen, die Kurzwellen hoher Leistung aussenden können – mit dem Ziel, elektromagnetische Prozesse in der Ionosphäre zu untersuchen. Da HAARP mit Beteiligung des US-Militärs gebaut wurde, kursieren unter Verschwörungsgläubigen Gerüchte, es handle sich um eine Geheimwaffe, die Erdbeben oder Wetterkatastrophen auszulösen vermöge oder gar fähig sei, unsere Gedanken zu manipulieren. Dafür reichen allein schon die verfügbaren Energien bei Weitem nicht aus. HAARP, das zwischenzeitlich stillgelegt und später zu Forschungszwecken vermietet werden sollte, bietet eher das triste Schauspiel eines Projekts, das die anfangs gehegten Erwartungen, ob nun ziviler oder militärischer Art, enttäuscht hat.

Eine geheime NS-Kolonie erforscht angeblich »Reichsflugscheiben«

Eine weitere Verschwörungstheorie hält die bei klarem Himmel sichtbaren Kondensstreifen von Verkehrsflugzeugen für so genannte Chemtrails – Spuren einer groß angelegten absichtlichen Vergiftung der Atmosphäre. Zweck sei wahlweise eine Beeinflussung des Klimas oder die weiträumige geheime Verbreitung von Impfstoffen oder bewusstseinsverändernden Drogen. Hümmler zeigt die Unsinnigkeit dieser Mär und schlägt vor, mittels eigener Beobachtungen von Wolken und Kondensstreifen dem Chemtrail-Mythos den Boden zu entziehen.

Es geht freilich noch bizarrer. Manche Leute glauben, in der Antarktis habe sich eine geheime Kolonie des NS-Regimes namens Neuschwabenland eingerichtet und erforsche dort Wunderwaffen, unter anderem eine so genannte Reichsflugscheibe, die einer fliegenden Untertasse gleichen soll. Wie Hümmler berichtet, gab es 1939 tatsächlich eine deutsche Expedition, bei der das Schiff »Schwabenland«, unterstützt von zwei Flugbooten, einen Teil der Antarktis kartografierte und durch abgeworfene Hakenkreuzfähnchen als »Neuschwabenland« für Nazideutschland beanspruchte. Diese Episode wird nun in esoterischen Kreisen weitergesponnen. Hümmler entkräftet Stück für Stück alle angeblichen Indizien dafür.

Am Ende klärt der Autor seine staunenden Leser über die Existenz zweier im Internet aktiver Forschungsgesellschaften auf, die den Beweis antreten möchten, dass die Erde eine flache Scheibe beziehungsweise eine Hohlkugel sei. Statt das einfach als Absurdität abzutun, zeichnet der Autor die historischen Vorläufer beider Weltmodelle nach und nennt geduldig Gründe, die dagegensprechen.

Hümmler spricht verschiedene Empfehlungen aus, wie mit Verschwörungsmythen und ihren Vertretern umzugehen sei. Es komme darauf an, die richtigen Fragen zu stellen, vor allem: Was wird eigentlich behauptet? Was kann ich selbst überprüfen? Wem darf man vertrauen? Zwar erwirbt sich der Autor damit durchaus Verdienste als fleißiger Mythenjäger, nur wirken seine sechs Beispiele wie aus der Zeit gefallen. Das Buch hätte er genauso auch schon vor 10 oder 20 Jahren schreiben können. Unberücksichtigt lässt er, was das Thema heute aktuell macht: dass nämlich länderübergreifend und von Populisten gefördert eine allgemeine Wissenschaftsfeindlichkeit um sich greift – nicht nur in den Echoräumen und Filterblasen des Internets.

Holm Gero Hümmler
VERSCHWÖRUNGSMYTHEN
Wie wir mit verdrehten Fakten für dumm verkauft werden
Hirzel, Stuttgart 2019
223 S., € 19,80



Da wird die epidemiologisch nachweisbare Gefährdung durch Autoabgase mit falschen Zahlen und dem Argument bestritten, es sei noch nie ein Patient mit akuter Stickoxidvergiftung aufgetaucht. Da treten in den reichen Industrieländern plötzlich wieder gehäuft Masernfälle auf, weil Impfgegner Panik verbreiten. Da leugnen Politiker mit einer großen Wählerschaft hinter sich die Realität des menschengemachten Klimawandels und streuen systematisch Desinformation darüber.

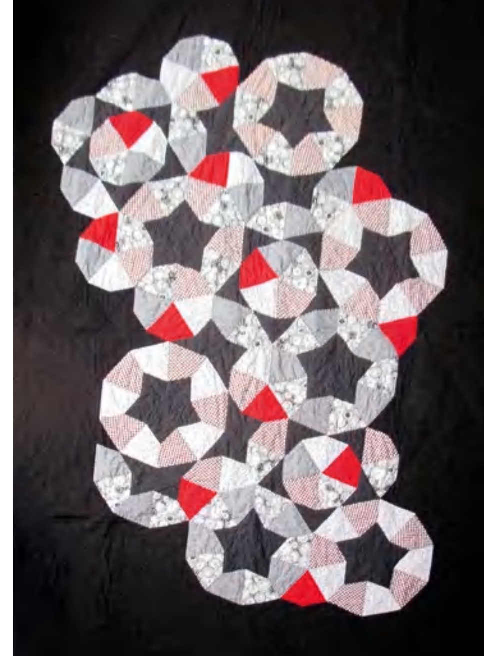
Gegen die heute grassierenden, teils massiven Angriffe auf Wissenschaftler, und generell auf empirisches und faktenbasiertes Vorgehen, wirken Hümmlers antiquierte Beispiele eher skurril, versponnen und harmlos. Der Autor hat leider die Chance verpasst, sich mit der akuten Gefahr wissenschaftsfeindlicher Verschwörungsmythen auseinanderzusetzen.

Der Rezensent Michael Springer ist Physiker und Mitarbeiter von **Spektrum** der Wissenschaft.



LUISE, BORIS UND HUBERT KLUGE, CREGLINGEN

Nichtperiodische Pflasterungen erzeugen ein Spannungsfeld von Ordnung und Chaos. Das sorgt für interessante Muster – wie hier bei einem Kissen (links) oder einem Quilt.



PARKETTIERUNG MIT STOFF

Pflasterungen mit einer seltsamen fünfzähligen Symmetrie eröffnen auch Künstlern reizvolle Möglichkeiten. (»Nichtperiodische Parkettkunst«, Mathematische Unterhaltungen, **Spektrum** Juli 2019, S. 80)

Luise, Boris und Hubert Kluge, Creglingen: Die Penrose-Parkettierung hat uns bereits vor 25 Jahren fasziniert, und gemeinsam haben wir in der Familie eine Quilt-Decke und ein Kissen entworfen und hergestellt. Da beide Teile schon mehrfach ausgestellt waren, haben wir die »Drachen« und »Pfeile« aus Karton ausgeschnitten und sie zum Parkettieren auf einen Tisch gelegt. Das regte die Besucher an, selbst mit diesen beiden Bausteinen zu experimentieren.

ENTTÄUSCHENDE AUSWERTUNG

Der Paläontologe Stephen Brusatte beschrieb neue Analysen, nach denen die Dinosaurier über Jahrmillionen nur eine Nebenrolle spielten. (»Der unwahrscheinliche Triumph der Dinosaurier«, **Spektrum** August 2019, S. 30)

Pertti Valkonen, Berlin: Es ist eine geradezu uralte Erkenntnis, dass die Dinos erst in der obersten Stufe der Trias, dem Keuper, aufkamen und dann nicht sofort »die Herrschaft übernahmen«. Schon in den 1980er Jahren schrieben Leute wie Walter Steiner oder Hartmut Haubold davon, dass sich die Dinosaurier erst ab dem späten Karnium und über das ganze Norium hinweg allmählich gegen die in demselben Zeitraum zurückgehenden (und bis dahin dominierenden) Crurotarsiern (man sprach noch von Thecodontiern) durchsetzten. Auch den im Artikel angesprochenen Rückgang der Rhynchosaurier in diesem Zeitraum benennt Haubold – und stellt einen Zusammenhang mit dem parallel dazu stattfindenden Aufstieg der Dinosaurier her.

Krokodile stellen auch heute mit die größten Raubtiere. Leben wir also noch immer im Zeitalter der Herrschaft der Archosaurier? Klar, die Krokodile sind auf die semiaquatischen Nischen begrenzt. Doch die triassischen amphibischen Riesenräuber waren ebenfalls an diesem Rand zu finden wie heuer die Krokodile.

Und dann so was: »Im argentinischen Ischigualasto-Reservat zum Beispiel machten die ersten Dinosaurier nur ungefähr 10 bis 20 Prozent des gesamten Ökosystems aus.« Zum Vergleich, nach den bei Wikipedia vermerkten Artenzahlen der Tetrapodengruppen der Amphibien, Reptilien, Vögel und Säugetiere stellen Letztere nicht einmal 20 Prozent des gesamten heutigen Ökosystems (der Landwirbeltiere). Und das reicht voll aus, um vom »Zeitalter der Säugetiere« zu sprechen.

Was die Formenvielfalt betrifft, so waren die triassischen Dinos in der Tat noch recht kümmerlich gegenüber der Radiation in Jura und Kreide. Allerdings vereinten die spättriassischen Dinos dennoch bereits eine beträchtliche Formenvielfalt.

Vor allem aber werden hier Äpfel mit Birnbäumen verglichen, wenn man die Dinosauriervielfalt mit der Vielfalt der Crurotarsi / Pseudosuchia vergleicht. Die Schwestergruppe der Crurotarsi sind nicht die Dinosauria, sondern die Ornithodira, also Dinosauria und Pterosauria zusammen. Und deren Formenvielfalt im Verbund toppte natürlich die der Pseudosuchier. Will man hingegen nur die Dinosauriervielfalt vergleichen, muss man dies mit den einzelnen Untergruppen der Crurotarsi anstellen, das heißt mit den Phytosauriern, den »Rauisuchiern« und den Crocodylomorpha – je für sich. Nicht mit allen diesen Gruppen zusammen. Und schon überflügeln die Dinosaurier jede einzelne Vergleichsgruppe noch vor Ende der Trias.

Michael Gansera, per E-Mail: Inzwischen hat Herr Brusatte seinen vierten Artikel zur Saurierevolution in »Spektrum« platziert. Ich warte gespannt auf den fünften. Denn was mir als leidenschaftlichem Evolutionsbiologen bisher fehlt, ist die Erläuterung, wie denn die von Herrn Brusatte so ausgiebig zitierte elektronische Auswertung anatomischer Merkmalen en detail geschieht.

Ich will Herrn Brusatte nicht Unrecht tun, aber nach seinen Artikeln zu schließen, ignorieren er und seine Kollegen Grundprinzipien systematischer evolutionsbiologischer Forschung. Ich vermisse in Brusattes Artikeln jeglichen Hinweis darauf, dass anatomische Merkmale an den von ihm untersuchten Fossilien nach der zoologisch-systematisch basalen Einstufung in plesiomorph (= ursprünglich) und apomorph (= abgeleitet) erfolgt.

Findet die Unterscheidung nicht statt, ist jeglicher Vergleich von Merkmalen ohne Aussagekraft, da keine Zuordnung in eine Entwicklungslinie mehr möglich ist. Damit werden Parallelentwicklungen (Fledermaus- und Vogelflügel) übersehen, und Fehlinterpretationen sind Tür und Tor geöffnet. Artaufspaltungen (adaptive Radiation) und Parallelentwicklungen (Synapomorphien) werden nicht erkannt und die Fossilfunde daher völlig falsch interpretiert. Die Fixierung auf computerbasierte Auswertung von Merkmalen – ohne Kenntnis der Herkunft der Merkmale – scheint mir, so wie Brusatte es bisher darstellt, eine Sackgasse zu sein.

Antwort der Redaktion:
In der Tat spielt die Unterscheidung zwischen Plesio- und Apomorphie eine wichtige Rolle in der Evolutionsbiologie. Mittels plesiomorphen oder ursprünglichen Merkmalen lässt sich die enge Verwandtschaft zweier Tiergruppen nicht nachweisen, da diese Merkmale schon vorhanden waren, bevor die beiden Tiergruppen entstanden. Apomorphe oder abgeleitete Merkmale stellen dagegen evolutive Neuheiten dar.

Besitzen zwei Tiergruppen ein gemeinsames abgeleitetes Merkmal, spricht man von Synapomorphie. Sie gilt als Nachweis für verwandte Schwestergruppen, die von einem gemeinsamen Vorfahren abstammen. Genau solche Synapomorphien betrachteten die Forscher um Stephen Brusatte.

Leserbriefe sind willkommen!

Schicken Sie uns Ihren Kommentar unter Angabe, auf welches Heft und welchen Artikel Sie sich beziehen, einfach per E-Mail an **leserbriefe@spektrum.de**. Oder kommentieren Sie im Internet auf **Spektrum.de** direkt unter dem zugehörigen Artikel. Die individuelle Webadresse finden Sie im Heft jeweils auf der ersten Artikelseite abgedruckt. Kürzungen innerhalb der Leserbriefe werden nicht kenntlich gemacht. Leserbriefe werden in unserer gedruckten und digitalen Heftausgabe veröffentlicht und können so möglicherweise auch anderweitig im Internet auffindbar werden.

SCHEINBARE TRÖPFCHENBÖGEN

Nasse Tiere trocknen ihr Fell, indem sie das anhaftende Wasser mit schnellen Drehungen zu den Haarspitzen drängen. (»Hunde im Schleudergang«, Schlichting!, **Spektrum** September 2019, S. 58)

Eduard Baumann, per E-Mail: Ein faszinierender Vorgang. Dass das Rückgrat nur eine Auslenkdrehamplitude von 30 Grad vollführt, die Haut und das Gewebe aber elastisch daraus 90 Grad machen, erinnert mich an den Peitscheneffekt. Auf dem Hundebild im Artikel fällt mir noch etwas auf: die gebogene Aufreihung der wegfliegenden Wassertropfen. Das erscheint uns natürlich, weil wir sie als Verlängerung der Fellhaare auffassen. In Wirklichkeit fliegt jeder Tropfen geradlinig radial weg! Der scheinbare Bogen kommt nur zu Stande, weil sich im Fell Wasserkanäle ausbilden, die dann wie ein Gartenschlauch wirken, den man dreht. Da kann man diese Tröpfchenbögen auch leicht erzeugen.



DIETERMEYRL / GETTY IMAGES / ISTOCK

Je nach Körpergröße schütteln sich Tiere mit unterschiedlicher Frequenz. So wird ein Retriever Wasser typischerweise bei 4,5 Hertz am besten los.

Wie wir das All eroberten

Jedes Ende ist ein neuer Anfang.
Eine Kurzgeschichte von Val Nolan

Viele fragen sich, wann wir aufhörten, wirklich menschlich zu sein. War es, als wir uns das erste Mal gegen Vakuum, Röntgenstrahlung und kosmische Partikel so weit abhärteten, dass wir im Weltall existieren konnten? Oder vielleicht, als wir uns physiologisch umformten, um das Sternenlicht für Fotosynthese zu nutzen? Oder noch später, nach dem Erlöschen der Sterne, als unsere Münder und Lungen wie hungrige Staustrahltriebwerke interstellaren Wasserstoff aufzusaugen begannen? Im Lauf der Gigajahre haben uns Ingenieurkunst und künstliche Evolution befähigt, erst Dunkle Materie zu verzehren und später Dunkle Energie, und das beschleunigte natürlich unsere Expansion unermesslich. Das Universum ist jetzt erfüllt von Menschen, die frei durchs Dunkel ziehen. Zu guter Letzt sind wir doch noch eine wahrhaft interstellare Spezies geworden.

Zunächst ernährten wir uns von den Monden und Planeten auf unserem Weg; wir sogen die Asteroiden und Kometen auf sowie alle vagabundierenden Objekte. Schließlich verdauten wir die Sterne selbst – alle, die es in unserer Milchstraße gab und alle in den mit uns kollidierenden Galaxien. Wir sind die ultimativen Selbstreplikatoren. Wir haben das Universum, seiner brutalen Leblosigkeit zum Trotz, in unzählige Kopien von uns selbst verwandelt. Unser exponentielles Wachstum erfüllt jeden Winkel des lokalen Weltraums. Ja, wir können noch immer Eis und Gase und kosmische Strahlen aus dem interstellaren Medium konsumieren, aber größtenteils beziehen wir unsere Energie nun aus tiefen Schichten der Realität, von denen unsere äffischen Vorfahren keine Ahnung hatten.

Zu guter Letzt sind wir doch noch zu einer echt interstellaren Spezies geworden

Doch vom Aussehen her ähneln wir weiterhin jenen fernen Ahnen. Ich vermute darin eine gewisse Sentimentalität unsererseits. Eine Marotte, die seit Äonen andauert. Obwohl wir vielleicht schlaksiger sind. Ausgedehnter. Wir schlängeln uns zwischen den Sternenhülsen durch, nicht wie Primaten, sondern eher wie die Meeresbewohner, die ihnen evolutionär vorausgingen. Wir haben größere Köpfe und breitere Hände als alle unsere Vorgänger, und wir suchen damit Kontakt, wenn wir einander begegnen. Wir melden uns in einfacher Gebärdensprache, denn wir mögen zwar in unserer Entwicklung ein Optimum erreicht haben, aber ganz unendlich werden wir nie. Weder können wir ein Universum vollständig ausfüllen noch können wir jemals hoffen, den Abstand zwischen uns restlos zu überwinden. Wie jene blechernen Von-Neumann-Maschinen aus uralter Zeit sind wir ein sich selbst fortpflanzendes System mit einem unauslöschlichen Fehler: Niemals werden wir das Pochen der menschlichen Einsamkeit beheben.

Selbst wenn wir so nah beisammen dahintreiben, dass wir einander berühren können, reicht das nicht aus, die künstlerischen Höhenflüge, die mathematischen Abstraktionen oder die Gedichte in unserem Kopf mitzuteilen. Also verflechten wir uns. Wir schweben durch den Raum als Knoten von Gliedern und als Bündel von Körpern. Zuerst paarweise. Dann in immer größeren Verbänden. Komplizierte Gemeinschaften aus Sehnsucht oder Annehmlichkeit, die mit der Zeit sogar für Eigenbrötler unwiderstehlich werden und selbst die Abweisendsten anziehen. Schließlich bilden wir Billionen Körper, die zusammen rotieren. Große Nebel aus Fleisch, so riesig, dass ihre fernsten Ränder verblassen.

Auf diese Weise sind wir gemeinsam über die Grenzen der chemischen Elemente hinausgewachsen. Wir haben Quantenfluktuationen und physikalische Keimbildungsprozesse überstanden. Nur mit der guten alten Schwerkraft werden wir nicht fertig. Hartnäckige und brillante Geister erforschen die Geheimnisse der Gravitation, aber dafür müssen sie sich noch enger, noch dichter verbinden. Ihr geballtes Wissen versucht just von jener Kraft, die sie im Bann hält, die befreiende Antwort zu erzwingen. Komplexe Urteile flackern wie elektrische Entladungen über die Scheiben aus rotierenden Körpern. Minuziöses Gebärdenspiel organisiert sich, bildet Institutionen und debattiert über Millionen und Abermillionen von Jahren hinweg. Inspiration und Mutmaßung befeuern die Geister. Leuchtende Augen öffnen sich wie unzählige Sonnen in strahlenden Gedankengalaxien.

Solche Vereinigungen schenken uns Träume von unerwarteter Schönheit, aber wenn wir überleben wollen, müssen wir wieder lernen, uns abzustoßen. Wir müssen beginnen, uns voneinander zu lösen, sonst erliegen wir dem unablässigen Druck der Schwerkraft. Davon zeugen die neuen Sterne, die am Himmel aufscheinen. Wo einst

Mehr Sciencefiction-Kurzgeschichten auf
spektrum.de/kurzgeschichte

wirbelnde Wolken von Tanz und Freude kündeten, brennen jetzt junge Sonnen. Wir alle erzittern unter einer Welle von Sorgen. Tausende von Umdrehungen lang überlegen wir, was zu tun ist. Wir müssen Berechnungen anstellen. Doch im Gefolge des heißen Lichts der neuen Sterne erreichen uns die verkohlten und unförmigen Körper, die bei ihrer Geburt ausgestoßen wurden. Verheerend schlagen sie in unsere eigenen unermesslichen Schwärme ein. Die Kollisionen bringen unsere Scheiben aus dem Gleichgewicht. Wir haben zu lange gezögert, und nun folgt eine Kettenreaktion von Kollaps, Destabilisierung und weiterem Zusammenbruch – auch eine Form von Selbstfortpflanzung!

Manche Ränder unserer Verbände verflüchtigen sich, aber die Mehrheit bleibt durch Schwerkraft gebunden. Für immer vereint und niemals zu trennen, so wie wir es wollten. Und so setzen wir unseren eigenen Kollaps in Gang. Unser Radius nimmt ab. Unsere Temperatur steigt. Der Wasserstoff, mit dem wir einst unser ursprüngliches Blut ersetzten, heizt sich auf und entweicht schließlich. Wir werden wieder fadenförmiger. Verrenken uns. Strecken uns weiter aus. Altern auf neue, ungewohnte Weise. Sehen zum ersten Mal seit unvordenklichen Zeiten dem Tod ins Auge. Unsere Gruppierungen werden deformiert, ordnen sich um und verlieren erneut ihre Form. Ich strecke meinen Arm aus, um den meines Nächsten zu fassen. Dann schließt sich uns noch jemand an. Dann noch einer und noch einer und noch einer. Wir werden zusammen dahingehen, wir werden Hand in Hand den letzten Augenblicken entgegentaumeln. Einwärtsfallen. Mit den Händen der anderen Muster bilden. Die Gesten für Hoffnung und Furcht machen. Für Stolz und Trauer. Aber kein Bedauern. Niemals Bedauern. Denn wir werden dem Universum etwas zurückgeben. Wir werden sehen, wie neue Lebensformen in unserem künftigen Licht gedeihen. Wir werden erneut strahlen. ◂

Nature 566, S. 290, 14. Februar 2019

DER AUTOR

Val Nolan unterrichtet Kreatives Schreiben an der Aberystwyth University in Wales. Seine Erzählungen sind in »The Year's Best Science Fiction« erschienen und gelangten in die Shortlist für den Theodore Sturgeon Award.



Chefredakteur: Dr. Daniel Lingenhöhl (v.i.S.d.P.)

Redaktionsleiter: Dr. Hartwig Hanser

Redaktion: Mike Beckers (stellv. Redaktionsleiter), Manon Bischoff, Robert Gast, Dr. Andreas Jahn, Dr. Klaus-Dieter Linsmeier (Koordinator Archäologie Geschichte), Karin Schlott, Dr. Frank Schubert, Verena Tang;
E-Mail: redaktion@spektrum.de

Freie Mitarbeit: Dr. Gerd Trageser

Art Direction: Karsten Kramarczik

Layout: Oliver Gabriel, Anke Heinzelmann, Claus Schäfer, Natalie Schäfer

Schlussredaktion: Christina Meyberg (Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle

Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe

Redaktionsassistenz: Andrea Roth

Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 104840, 69038 Heidelberg, Hausanschrift: Tiergartenstraße 15–17, 69121 Heidelberg, Tel.: 06221 9126-600, Fax: 06221 9126-751, Amtsgericht Mannheim, HRB 338114

Geschäftsleitung: Markus Bossle

Herstellung: Natalie Schäfer

Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel.: 06221 9126-741,
E-Mail: service@spektrum.de

Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel.: 06221 9126-744

Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Dr. Katja Mellenthin, Dr. Michael Springer, Dr. Sebastian Vogel.

Leser- und Bestellservice: Helga Emmerich, Sabine Häusser, Ilona Keith, Tel. 06221 9126-743, E-Mail: service@spektrum.de

Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o ZENIT Pressevertrieb GmbH, Postfach 810680, 70523 Stuttgart, Tel.: 0711 7252-192, Fax: 0711 7252-366,
E-Mail: spektrum@zenit-presse.de, Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn

Bezugspreise: Einzelheft € 8,90 (D/A/L), CHF 14,–; im Abonnement (12 Ausgaben inkl. Versandkosten Inland) € 93,–; für Schüler und Studenten gegen Nachweis € 72,–. PDF-Abonnement € 63,–, ermäßigt € 48,–.

Zahlung sofort nach Rechnungserhalt. Konto: Postbank Stuttgart,
IBAN: DE52 6001 0070 0022 7067 08, BIC: PBNKDEFF

Die Mitglieder von ABSOLVENTUM MANNHEIM e. V., des Verbands Biologie, Biowissenschaften und Biomedizin in Deutschland (VBio) und von Mensa e. V. erhalten Spektrum der Wissenschaft zum Vorzugspreis.

Anzeigen: Karin Schmidt, Markus Bossle, E-Mail: anzeigen@spektrum.de, Tel.: 06221 9126-741

Druckunterlagen an: Natalie Schäfer, E-Mail: schaefer@spektrum.de

Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 40 vom 1.1. 2019.

Gesamtherstellung: L.N. Schaffrath Druckmedien GmbH & Co. KG, Marktweg 42–50, 47608 Geldern

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN
1 New York Plaza, Suite 4500, New York, NY 10004-1562
Acting Editor in Chief: Curtis Brainard, President: Dean Sanderson, Executive Vice President: Michael Florek





Das Dezemberheft ist ab 16. 11. 2019 im Handel.

VORSCHAU



SAKKMESTERKE / GETTY IMAGES / ISTOCK; HINTERGRUND: ALTAYB / GETTY IMAGES / ISTOCK; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

ALLES ANDERE ALS LEER

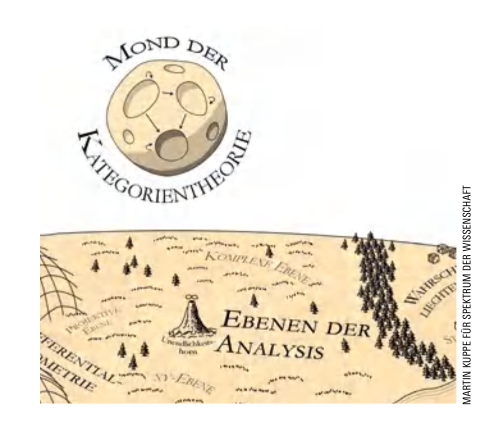
Lange war man überzeugt, das Vakuum beschreibe einen leeren Raum. Doch die Quantenphysik belehrt uns eines Besseren: Es ist erfüllt von Quantenfeldern, die zu seltsamen Phänomenen führen. In den nächsten Jahren wollen Forscher in einer Reihe von Experimenten nach und nach die letzten Geheimnisse des Nichts enthüllen.



JON FOSTER / SCIENTIFIC AMERICAN JULI 2018

MENÜ DER STEINZEIT

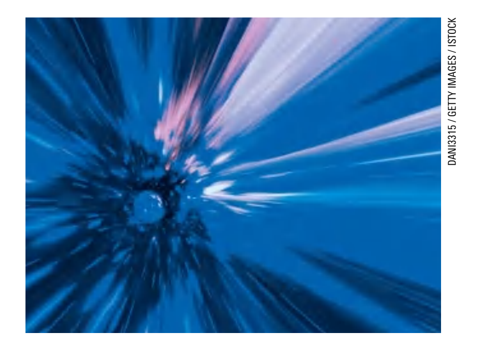
Fossile Zähne verraten, was unsere Vorfahren einst verspeist haben. Sie offenbaren damit gleichzeitig, wie Klimaveränderungen die Evolution des Menschen beeinflussten.



MARTIN KUPPE FÜR SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

MATHEMATIK AUS DER VOGELPERSPEKTIVE

Die Kategorientheorie deckt unerwartete Zusammenhänge zwischen verschiedensten Disziplinen auf, von diversen mathematischen Bereichen über die Physik bis hin zur Linguistik.



DANI3315 / GETTY IMAGES / ISTOCK

SCHUSS INS BLAUE

Traditionelle Antriebstechniken befördern Raumsonden weder besonders schnell noch sehr weit ins All. Einige Wissenschaftler hoffen auf eine Revolution – und verfolgen dafür exotische Ideen an den Grenzen der bekannten Physik.

NEWSLETTER

Möchten Sie über Themen und Autoren des neuen Hefts informiert sein?
Wir halten Sie gern auf dem Laufenden: per E-Mail – und natürlich kostenlos.

Registrierung unter:

spektrum.de/newsletter